

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

UPLATNĚNÍ PRYŽOVÉHO GRANULÁTU V ASFALTOVÝCH POJIVECH A HUTNĚNÝCH ASFALTOVÝCH SMĚSÍCH

APPLICATION OF CRUMB RUBBER IN BITUMINOUS BINDERS AND IN BITUMINOUS MIXTURES

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE
ANOTATION OF Ph.D. THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. ONDŘEJ DAŠEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. JAN KUDRNA, CSc.

BRNO 2013

KLÍČOVÁ SLOVA

Silniční asfalt, odpadní pneumatika, pryžový granulát, asfalt modifikovaný pryžovým granulátem, CRmB, gumoasfalt, reologie, asfaltová směs s CRmB, pokusný úsek, technické podmínky.

KEY WORDS

Paving grade bitumen, waste tire, crumb rubber, crumb rubber modified bitumen, asphalt rubber, rheology, asphalt rubber mixture, test section, technical recommendation.

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Ústav pozemních komunikací a Knihovnické a informační centrum FAST VUT v Brně

ABSTRACT

Presented dissertation thesis is focused on the possibility of using the crumb rubber from waste tires for modification of paving grade bitumen. The resulting asphalt rubber can be used as an alternative to polymer modified bitumen in compacted bituminous mixtures. The theoretical part describes the rheological properties of asphalt binders and the history and today state of the art in the world and in the Czech Republic. The practical part of the work contains a description of the properties of chosen crumb rubbers and produced asphalt rubbers focused on their rheological properties and on change of these properties caused by the aging at high temperature. Subsequently, the chosen empirical and functional properties of bituminous mixtures with asphalt rubber are described. Laboratory properties of these mixtures were verified under real service conditions on 32 test sections. Based on the dissertation thesis results the preliminary technical specification of the Ministry of Transport (TP 148) and their following revision were approved. The conclusion of the work summarizes and highlights the results of the dissertation.

OBSAH

| | |
|--|----|
| 1 ÚVOD..... | 4 |
| 2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE..... | 4 |
| 3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY | 5 |
| 3.1 Asfalt modifikovaný pryžovým granulátem | 5 |
| 3.2 Postupy zabudování pryžového granulátu do asfaltových směsí..... | 6 |
| 3.3 Asfaltové směsi s CRmB | 7 |
| 4 VLASTNOSTI PRYŽOVÝCH GRANULÁTŮ | 8 |
| 5 VLASTNOSTI ASFALTŮ MODIFIKOVANÝCH PRYŽOVÝM GRANULÁTEM | 8 |
| 5.1 Vliv druhu pryžového granulátu na vlastnosti CRmB | 9 |
| 5.2 Reologické vlastnosti CRmB | 9 |
| 5.3 Odolnost CRmB proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu | 17 |
| 6 VLASTNOSTI ASFALTOVÝCH SMĚSÍ S CRmB..... | 21 |
| 6.1 Výběr asfaltových směsí s CRmB pro laboratorní zkoušky | 21 |
| 6.2 Odolnost vůči vzniku trvalých deformací | 24 |
| 6.3 Odolnost zkušebních těles vůči vodě | 24 |
| 6.4 Nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin..... | 25 |
| 6.5 Tuhost asfaltových směsí | 26 |
| 6.6 Odolnost vůči únavě..... | 27 |
| 7 POKUSNÉ ÚSEKY | 28 |
| 8 ZPRACOVÁNÍ TECHNICKÝCH PODMÍNEK TP 148..... | 31 |
| 9 ZÁVĚR A SHRUTÍ..... | 32 |
| SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 35 |
| ŽIVOTOPIS..... | 36 |

1 ÚVOD

V posledních letech vzrůstá stupeň automobilizace, který je úzce spjat se zvyšováním spotřeby paliv, materiálů a výrobků, mezi které lze počítat i automobilové pneumatiky. Při jejich průmyslové výrobě a používání vzniká velké množství látek, které je třeba později zpracovat nebo uložit na meziskládky nebo skládky. S rostoucím stupněm automobilizace rovněž dochází ke zrychlenému vývoji poruch vozovek v ČR, zvláště vývoji trhlin a výtluků, což vede ke snižování doby životnosti asfaltových vozovek a ke zvyšování hlukových emisí.

Výše popsané problémy je možné řešit řadou přístupů či jejich kombinací. Disertační práce se zaměřuje na řešení výše jmenovaných problémů použitím asfaltových směsí obsahujících asfalt modifikovaný pryžovým granulátem. Zabudováním pryžového granulátu do asfaltových směsí dojde nejen k využití odpadního materiálu (ojeté pneumatiky) do nového výrobku, kterým je asfaltová směs, ale při správné aplikaci dojde rovněž ke zlepšení jejich vlastností. Primárním podnětem pro využití pryžového granulátu v asfaltové směsi tedy není jen zabudovat odpadní materiál, ale zlepšit vlastnosti a trvanlivost hutněné asfaltové vrstvy.

Disertační práce je rozdělena na část teoretickou, ve které jsou popsány reologické vlastnosti asfaltových pojiv a historie a současný stav řešené problematiky ve světě a v ČR a na praktickou část, ve které jsou popsány vlastnosti vybraných pryžových granulátů, asfaltů modifikovaných pryžovými granuláty a asfaltových směsí s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem. Dále jsou stručně popsány jednotlivé pokusné úseky, na kterých byly využity asfaltové směsi s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem a zpracování technických podmínek TP 148. V závěru jsou provedené práce shrnuty a zdůrazněny výsledky disertační práce.

2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Hlavním cílem disertační práce je zavedení technologie asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem (CRmB) metodou mokrého procesu (kontinuální výroba CRmB) do podmínek České republiky a umožnění jejího využívání v běžné praxi. Toho se docílí následujícími dílčími cíli:

- Sumarizace informací o současném stavu technologie využití pryžového granulátu pro modifikaci silničního asfaltu a provedení rešerše odborné literatury týkající se dané problematiky.
- Provedení optimalizace složení CRmB a popis jeho empirických a reologických vlastností.
- Provedení optimalizace složení asfaltových směsí s CRmB pro podmínky ČR a popis jejich funkčních vlastností.
- Ověření vlastností vybraných asfaltových směsí s CRmB na pokusných úsecích.

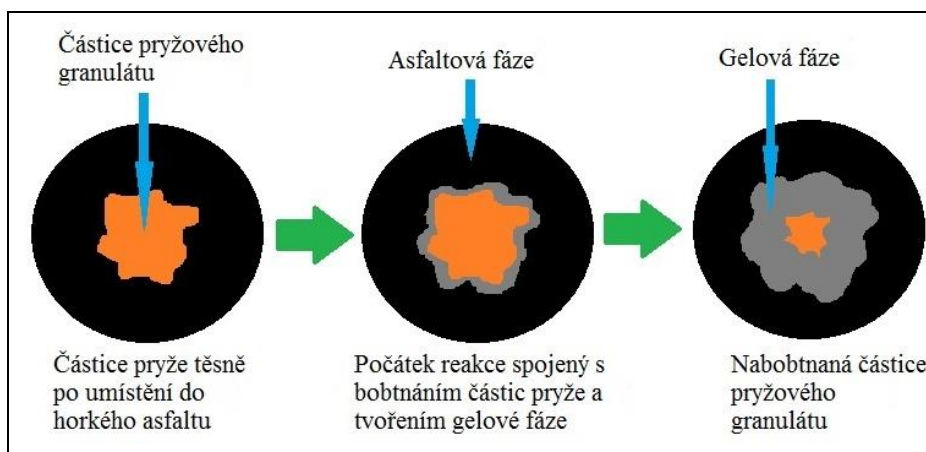
- Sestavení mechanismu kontroly vlastností asfaltů modifikovaných pryžovými granuláty a vlastností asfaltových směsí s CRmB.
- Vytvoření Technických podmínek Ministerstva dopravy pro technologii asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem.

3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Technologie přidavku pryžového granulátu do silničního asfaltu a asfaltových směsí se do Evropy dostala z USA, kde vznik silničních materiálů s přidavkem pryžového granulátu se datuje do konce třetího desetiletí 20. století. V USA se pro popsanou technologii nejčastěji používá název Asphalt Rubber (popř. Rubberized Asphalt), z čehož vzniklo slovo gumoasfalt, kterým se hovorově označuje technologie, pojivo i asfaltová směs. Tato technologie se nejčastěji využívá v některých státech USA (Kalifornie, Arizona, Texas, Florida, Jižní Karolína, Nebraska) a dále například v Portugalsku, Švédsku, Španělsku, Brazílii a Číně.

3.1 ASFALT MODIFIKOVANÝ PRYŽOVÝM GRANULÁTEM

Gumárenská směs používaná při výrobě pneumatik obsahuje různé složky, z nichž hlavní představují syntetický kaučuk a přírodní kaučuk. Po přidání pryžového granulátu získaného zpracováním ojetých pneumatik do silničního asfaltu prudce vzroste dynamická viskozita pojiva. To je způsobeno fyzikálním „zahuštěním“ asfaltu, podobně jako u přidavku fileru (účinek částic). Poté se začínají uplatňovat procesy, kdy částice pryže absorbují lehké frakce asfaltu (malteny). Tuto interakci lze označit jako „bobtnání polymeru“. Současně se na povrchu částic pryžového granulátu začne vytvářet gelová vrstva, která je obalena asfaltovou fází, což je vidět na obrázku 1 [10]. Odstraněním lehkých složek asfaltu a zvětšením objemu částic granulátu dochází k dalšímu zvyšování viskozity pojiva, což vede ke změnám vlastností v průběhu času (účinek interakce). [7]



Obr. 1 Proces fyzikální reakce silničního asfaltu s pryžovým granulátem

Reakce silničního asfaltu s pryžovým granulátem je závislá zejména na teplotě, době trvání reakce, na intenzitě míchání částic granulátu s asfaltem, chemickém složení asfaltu i granulátu, způsobu výroby pryžového granulátu a na velikosti a tvaru částic pryže. Po dosažení bodu saturace částic pryže se viskozita pojiva

přestává zvyšovat a začíná dominovat změkčení částic pryže umožněné devulkanizací. To znamená, že dochází k částečné nebo úplné destrukci síťové struktury tvořené příčnými vazbami vzniklými v průběhu vulkanizace při výrobě pryže. Při vyšších teplotách nebo při dlouhodobější reakci asfaltu a pryžového granulátu dochází k depolymerizaci, tzn. rozpojení pevnějších hlavních řetězců polymerů. Oba popsání děje (devulkanizace a depolymerizace) souhrnně označované jako degradace pryžových částic jsou spojeny s postupným snižováním dynamické viskozity CRmB a se změnou jeho reologických vlastností. [1], [3], [5], [8], [11]

3.2 POSTUPY ZABUDOVÁNÍ PRYŽOVÉHO GRANULÁTU DO ASFALTOVÝCH SMĚSÍ

Existuje několik postupů pro zabudování pryžového granulátu z ojetých pneumatik do asfaltových směsí, z nichž světově nejznámější a nejvyužívanější jsou:

1. **Suchý proces** (označení vzniklo z výrazu „dry process“) je technologie pocházející ze Švédska. Ve světě je tato metoda známá pod obchodním označením PlusRide a v ČR pod označením Rubit. Při využití této technologie je pryžový granulát zrnitosti 0/1 mm a 1/4 mm přidáván do míchačky obalovny ve stejné fázi jako kamenivo. Používají se silniční asfalty gradace 70/100 nebo 50/70 podle ČSN EN 12591 a kamenivo stejné zrnitosti jako pro směs asfaltového koberce mastixového podle ČSN EN 13108-5 se zrnitostí 0/11 mm. Od využívání této metody se však v ČR upustilo.
2. **Mokrý proces** (název vznikl z označení „wet process“ pocházejícího z USA), v ČR nejčastěji označovaný jako **asfalt modifikovaný pryžovým granulátem** a zkratkou **CRmB**, která vznikla z anglických slov „Crumb Rubber modified Bitumen“. Tento postup se v ČR hovorově označuje jako „**gumoasfalt**“ a je světově nejrozšířenější technologií zpracovávající pryžový granulát v asfaltových směsích. Technologii přídatku pryžového granulátu do asfaltu je možné rozdělit na kontinuální výrobu pojiva na obalovně (continuous blend) a terminálovou výrobu pojiva v rafinerii s přísadami omezujícími usazování pryžového granulátu s omezenou dobou zpracovatelnosti (terminal blend).
 - Při **kontinuální metodě** výroby CRmB se pojivo vyrábí ve speciálním mísicím zařízení, které je umístěno na obalovně asfaltových směsí. Modifikovaný asfalt je míchán po celou dobu interakce pryžového granulátu se silničním asfaltem. Nejcitlivější vlastností pojiva a ukazatelem kvality je dynamická viskozita, která se během skladování za horka mění a je kontrolována vřetenovým viskozimetrem. Při výrobě CRmB v mobilním nebo stacionárním zařízení přímo na obalovně je do asfaltového pojiva vmícháván pryžový granulát nejčastěji v množství 15 % až 25 % při teplotě 170 °C až 185 °C. Poté se pojivo přivádí do reakční nádrže zařízení a stále se promíchává. Při míchání asfalt „reaguje“ s pryží a pojivo se modifikuje. CRmB se čerpá zubovým čerpadlem k dávkovacímu zařízení obalovny. Této technologii se věnuje převážná část disertační práce.

- Při využití **terminálové metody** výroby CRmB se pojivo většinou vyrábí modifikací asfaltu jemnozrnným pryžovým granulátem v rafinerii podobně jako polymerem modifikovaný asfalt. Většinou se používá nižší množství jemného pryžového granulátu (5 % až 15 %) a chemické přísady dočasně udržující jemné částice pryže rozptýlené v celém objemu pojiva (evropský přístup). Druhou možností je dlouhodobé zahřívání pojiva při vysoké teplotě, čímž vznikne téměř homogenní pojivo (americký přístup). [9]
3. Technologie **koncentrátu asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem** (zkráceně **koncentrát CRmB**) je kombinací suchého procesu a metody terminálové výroby pojiva. Jedná se o sypký granulovaný koncentrát (předsměs) dodávaný v plastových pytlích, připravený v míchacím centru a obsahující 30 % až 50 % pryžového granulátu. Po smíchání koncentrátu CRmB se silničním asfaltem lze připravit CRmB o různé viskozitě. [2]

3.3 ASFALTOVÉ SMĚSI S CRmB

Hlavním důvodem modifikace silničních asfaltů pryžovými granuláty je zlepšení vlastností asfaltových pojiv a tím i asfaltových směsí a vrstev. Asfaltové směsi je možné rozdělit podle čáry zrnitosti na:

- směsi s uzavřenou zrnitostí (dense graded) – čára zrnitosti je plynulá a není příliš vhodná pro stmelení asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem,
- směsi s přerušenou zrnitostí (gap graded) – čára zrnitosti není plynule zrněná, většinou jedna nebo více frakcí kameniva chybí a obsah fileru je nízký; hrubé kamenivo vytvoří kvalitně zaklíněnou kostru a
- směsi s otevřenou zrnitostí (open graded) – zrnitost směsi kameniva má vysokou mezerovitost s propojenými dutinami, které umožňují průtok vody, kamenivo se většinou skládá ze dvou nebo tří frakcí kameniva s velice nízkým obsahem filerických částic.

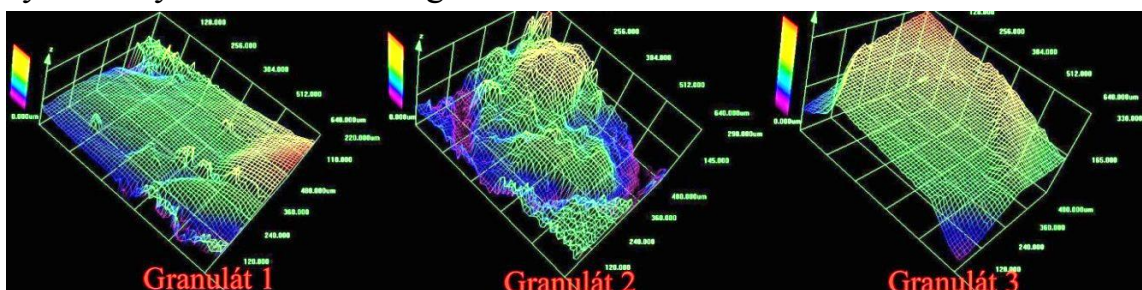
CRmB se s výhodou použije do vrstev se zvýšenými nároky na odolnost vůči vzniku únavových, mrazových a reflexních trhlin a do drenážních vrstev, které by vykazaly nedostačující životnost s použitím konvenčních pojiv. Nejčastěji jsou asfaltové směsi s CRmB používány pro tenkovrstvé úpravy při opravách a rekonstrukcích vozovek porušených trhlinami a korozí.

Aby byly asfaltové směsi s vysoce viskózním CRmB zpracovatelné, je nutné dávkovat vyšší množství pojiva než v případě asfaltových směsí s konvenčními pojivy. Díky vyššímu obsahu pojiva a jeho vyšší viskozitě je nutné čáru zrnitosti asfaltových směsí s CRmB posunout níže, tj. snížit obsah drobného kameniva v asfaltové směsi tak, aby byl zajištěn prostor pro pojivo v kostře kameniva. Návrhové vstupní složení směsi kameniva s použitím CRmB leží při spodních mezních čarách zrnitosti příslušných typů asfaltových směsí podle odpovídajících norem řady ČSN EN 13108. Proto je možné vyrábět mezerovité asfaltové směsi a jemnozrnné asfaltové směsi s dodržением jejich dostatečné životnosti a tenkovrstvé úpravy (běžně 20 mm až 30 mm).

Protože vlastnosti CRmB „vybočují“ z požadavků normy ČSN EN 12591 i ČSN EN 14023, nelze CRmB přesně popsat těmito předpisy a použít je pro klasifikaci CRmB. Rovněž složení asfaltových směsí s CRmB je nutné modifikovat oproti předpisům používaným pro asfaltové směsi s konvenčními pojivy (normy řady ČSN EN 13108). Proto byl vyvinut tlak na vydání nového technického předpisu, který by umožnil použití technologie asfaltů modifikovaných pryžovým granulátem v hutněných asfaltových směsích v podmínkách ČR.

4 VLASTNOSTI PRYŽOVÝCH GRANULÁTŮ

Tvar částic pryžového granulátu je jedním z faktorů ovlivňujících intenzitu a průběh reakce se silničním asfaltem. Pro popis tvaru částice vybraných pryžových granulátů byly provedeny snímky na konfokálním mikroskopu. Byly vybrány tři rozdílně připravené pryžové granuláty se zrnitostí 0/1 mm. První granulát byl vyroben metodou vícenásobného mechanického mletí za běžné teploty (granulát 1). Druhý pryžový granulát (granulát 2) byl vyroben stejnou metodou, ale navíc byl po namletí zkalandrován (povrchově upraven). Třetí granulát byl vyroben metodou kryogenního drcení (granulát 3). Horní část vybraného zrna jednotlivých granulátů byla zachycena se 480násobným zvětšením a byly vyhotoveny trojrozměrné nitkové grafy jednotlivých zrn (obrázek 2). Nejhladší povrch má zrno pryžového granulátu vyrobené metodou kryogenního drcení a nejčlenitější povrch má zrno granulátu, který byl po vyrobení vícenásobným mletím za běžné teploty zkalandrován. Tyto závěry potvrzuje analýza naměřených dat povrchové drsnosti v deseti navzájem kolmých svislých řezech zrnem granulátu.



Obr. 2 Nítkové grafy povrchů zrn pryžových granulátů vyrobených různými metodami

Zrnitost pryžových granulátů lze zjistit síťovým rozbořem podle ČSN EN 933-1 a ČSN EN 933-2 metodou prosévání za sucha se zkušební navážkou s hmotností přibližně 100 g. Při prosévání některých druhů pryžových granulátů (obzvláště kalandrovaných granulátů) se mohou tvořit na jednotlivých sítích shluky spojených částic granulátu. V tom případě je možné propad zrn spojených jednotlivými výběžky zrn zajistit pohybem nádoby s plochým dnem po sítě.

5 VLASTNOSTI ASFALTŮ MODIFIKOVANÝCH PRYŽOVÝM GRANULÁTEM

Vlastnosti asfaltů modifikovaných pryžovými granuláty (CRmB) byly zjišťovány na laboratorně vyrobených pojivech. Silniční asfalt s teplotou 180 °C byl laboratorní

míchačkou smísen s odpovídajícím množstvím pryžového granulátu s laboratorní teplotou po dobu 60 minut.

5.1 VLIV DRUHU PRYŽOVÉHO GRANULÁTU NA VLASTNOSTI CRmB

Vliv použitého pryžového granulátu na vlastnosti CRmB byl zjišťován smísením silničního asfaltu gradace 50/70 s běžně dostupnými pěti druhy pryžových granulátů. Vlastnosti pojiv byly hodnoceny zkouškami dynamické viskozity, penetrace jehlou, bodu měknutí a resilience. Z výsledků lze učinit následující závěry:

- Reakce silničního asfaltu s pryžovým granulátem vyrobeným z technické odpadní pryže se téměř neprojevila, došlo pouze k „zahuštění“ vlivem přítomnosti zrnitého materiálu (účinek inertních částic plniva). Rovněž dynamická viskozita pojiva se v čase nezvyšovala.
- Běžný pryžový granulát s nízkým obsahem jemných částic poskytl minimální požadovanou viskozitu při 16,7 % dávkování.
- Pryžový granulát s vysokým podílem pryže z pneumatik z nákladních automobilů (cca 70 % až 80 %) poskytuje nejvyšší viskozitu a umožňuje snížit dávkování granulátu na 14,5 % z hmotnosti CRmB, tj. mírně pod minimální množství granulátu podle doporučení ASTM D6114-97. Tuto skutečnost je možné vysvětlit původem pryžového granulátu (vysoký obsah přírodního kaučuku v pneumatikách nákladních vozidel). Vzhledem k původu granulátu je ovšem značně nákladný a nesnadno dostupný.
- Smísením pryžových granulátů s různými vlastnostmi od různých výrobců se silničními asfalty běžně dostupnými v ČR bylo zjištěno, že optimální dávkování pryžového granulátu se nachází v rozmezí 14,5 % až 17,0 %. V rámci tohoto intervalu je zajištěno dostatečné modifikování silničního asfaltu a současně zajištěna čerpatelnost pojiva a zpracovatelnost asfaltové směsi s CRmB.
- Nejvhodnější zkouškou pro posuzování vlastností asfaltů modifikovaných pryžovým granulátem je zkouška dynamické viskozity, protože prokázala vysokou citlivost na rozdílné vlastnosti pojiv. Další výhodou zkoušky je také možnost jejího použití přímo po míchání asfaltu s granulátem, ostatní zkoušky jsou použitelné až po přípravě vzorků.
- S rostoucí dobou míchání silničního asfaltu s pryžovým granulátem vzrůstá hodnota dynamické viskozity (s výjimkou pryžového granulátu vyrobeného z technické odpadní pryže).

5.2 REOLOGICKÉ VLASTNOSTI CRmB

Z důvodu hledání optimálního složení asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem (CRmB) a popisu jeho reologických vlastností byly laboratorně vyrobeny asfalty modifikované pryžovým granulátem s 11 %, 13 %, 15 % a 17 % obsahem pryžového granulátu. Na těchto pojivech byly stanoveny vybrané reologické vlastnosti v dynamickém smykovém reometru (DSR). Pro zkoušky byl

použit silniční asfalt výrobce OMV gradace 50/70, pryžový granulát G1 výrobce Kovosteel, s.r.o. se zrnitostí 0/0,7 mm a polymerem modifikovaný asfalt PmB 45/80-75 výrobce Paramo a.s. Dále byly provedeny zkoušky penetrace jehlou, bodu měknutí, dynamické viskozity, penetrace a pružné regenerace (resilience) a vratné duktility. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 1. Z tabulky je patrné, že s rostoucím obsahem pryžového granulátu se snižuje penetrace a zvyšuje bod měknutí, viskozita, resilience i vratná duktilita.

Tab. 1 Vlastnosti CRmB

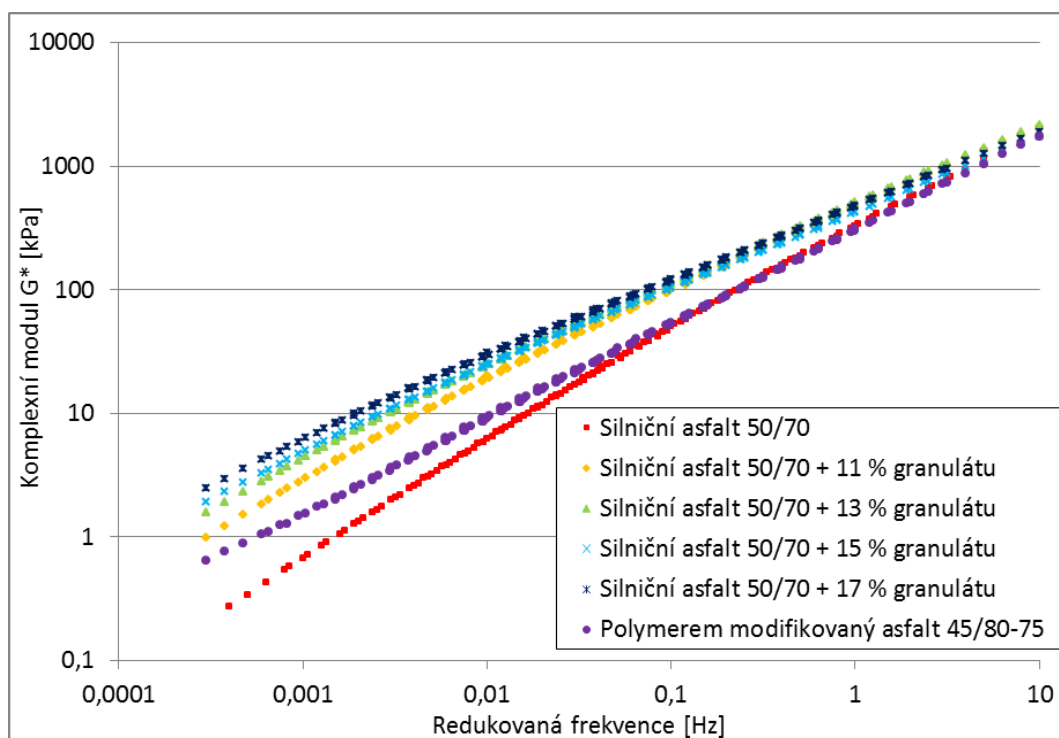
| Obsah granulátu v CRmB | 11 % | 13 % | 15 % | 17 % |
|----------------------------|------|------|------|------|
| Penetrace jehlou [0,1 mm] | 45 | 42 | 38 | 35 |
| Bod měknutí [°C] | 55,2 | 59,7 | 61,2 | 64,7 |
| Dynamická viskozita [Pa·s] | 0,7 | 0,9 | 1,9 | 2,7 |
| Resilience [%] | 15 | 20 | 21 | 27 |
| Vratná duktilita [%] | 40,0 | 52,9 | 55,1 | 60,5 |

Pro reologická měření byl využit rotační reometr Kinexus britského výrobce Malvern. Před vlastním měřením byly na vybraných pojivech určeny oblasti lineárně viskoelastického chování při okrajových zkušebních teplotách a frekvencích zatěžování. Na pojivech byla provedena reologická měření v oscilaci s řízeným smykovým přetvořením. Byl určen komplexní smykový modul pojiv (G^*) a úhel fázového posunu (δ) při teplotách 30 °C, 35 °C, 40 °C, 45 °C, 50 °C, 55 °C a 60 °C a při sadách frekvencí zatěžování 0,1 Hz až 10 Hz. Průměr vzorku (tj. průměr měřicích destiček) byl 25 mm a tloušťka vzorku (velikost mezery, tj. vzdálenost horní a dolní destičky) byla pro silniční asfalt a polymerem modifikovaný asfalt 1 mm a pro asfalty modifikované pryžovým granulátem 2 mm. Větší tloušťka vzorků CRmB a průměr vzorků 25 mm při všech teplotách a frekvencích byly zvoleny z důvodu eliminování vlivu přítomnosti částic pryže a tudíž nehomogenity pojiva na výsledky reologických měření [4], [6].

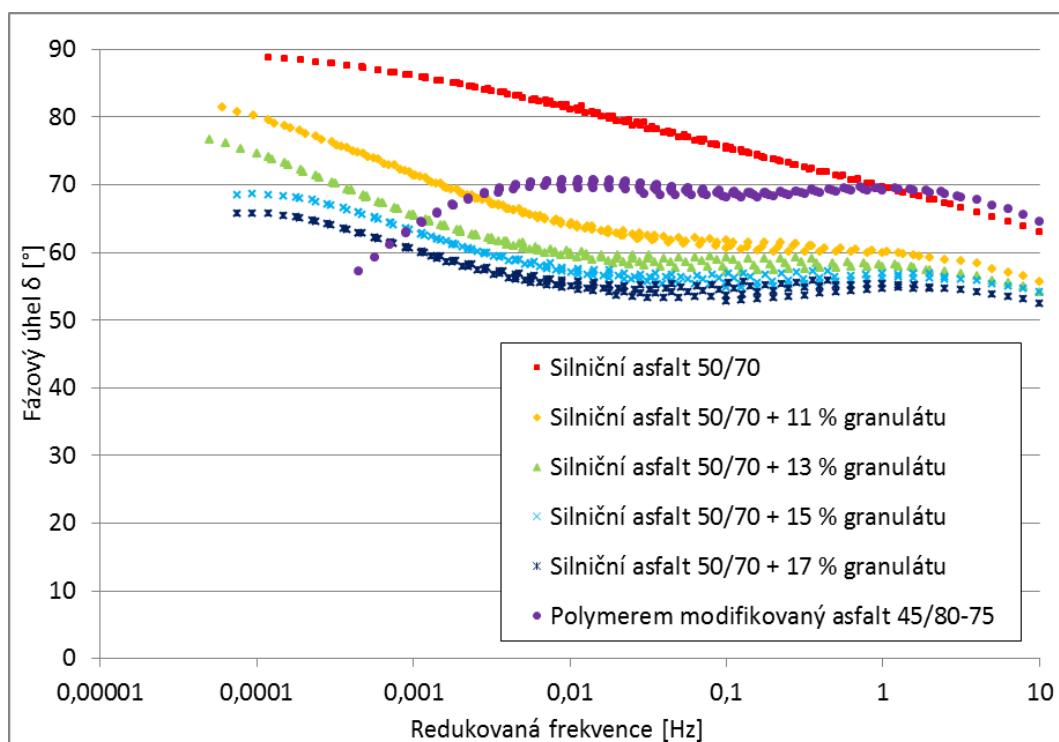
Na grafu 1 je zaznamenáno srovnání hlavních (kmenových) křivek komplexních smykových modulů jednotlivých pojiv, které byly vytvořeny časově teplotní superpozicí metodou volného posunu pro referenční (řídící) teplotu 30 °C. Z křivek je možné vysledovat, že asfalty modifikované pryžovým granulátem mají téměř v celém sledovaném časově frekvenčním rozsahu vyšší tuhosti než silniční i polymerem modifikovaný asfalt. Při zvolených nízkých teplotách a vysokých frekvencích zatěžování se tuhost pojiv srovnává, z čehož vyplývá, že CRmB mají nižší teplotní citlivost než běžné silniční asfalty a tedy širší obor plasticity.

Na grafu 2 jsou uvedeny hlavní křivky úhlu fázového posunu jednotlivých pojiv. Je z nich patrné, že CRmB mají v celém hodnoceném teplotně frekvenčním rozsahu nižší úhel fázového posunu než silniční asfalt, což svědčí o vyšší pružnosti asfaltů modifikovaných pryžovým granulátem. Lze to vysvětlit vytvořením polymerní sítě, ve které elastické vlastnosti pryže převládnu nad typicky viskózním chováním nemodifikovaného silničního asfaltu. Tento trend má úzkou vazbu na obsah

granulátu – s rostoucím obsahem pryžového granulátu se pojivo stává tužší a pružnější.



Graf 1 Srovnání hlavních křivek komplexních modulů pojiv



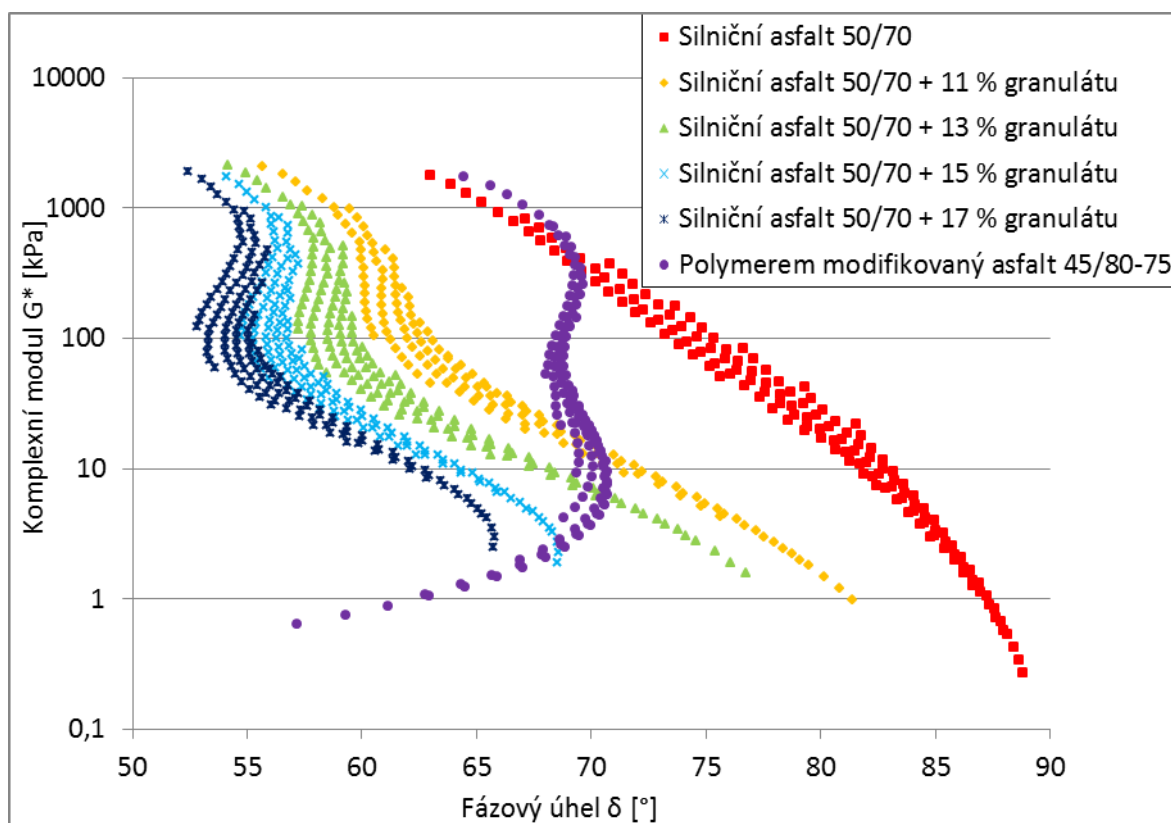
Graf 2 Hlavní křivky úhlu fázového posunu jednotlivých pojiv

Pouze u vysoce modifikovaného asfaltu polymerem je fázový úhel nižší v oblasti pod 0,001 Hz (v průběhu hlavní křivky) než je tomu v případě CRmB. Lze to

vysvětlit vlivem přítomnosti polymerní přísady, která získává převahu nad viskózním chováním asfaltu, ve kterém je rozptýlena.

Teplotní citlivost CRmB závisí na dávkovaném množství pryžového granulátu, podíly komplexních modulů při teplotě 30 °C a 60 °C jsou pro CRmB s 11 %, 13 %, 15 % resp. 17 % granulátu 65, 50, 39 resp. 37. Nejvyšší fázové úhly dosahoval při teplotách 30 °C až 60 °C silniční asfalt a následoval polymerem modifikovaný asfalt. Fázový úhel polymerem modifikovaného asfaltu se ovšem při teplotě nad 55 °C snižuje, což je vítaná vlastnost vzhledem k omezení tvorby trvalých deformací. Fázové úhly CRmB byly silně závislé na dávkovaném množství pryžového granulátu – s rostoucím obsahem pryžového granulátu fázový úhel klesá v celém sledovaném teplotním rozsahu.

Vhodné zobrazení reologického chování je formou Blackova diagramu, což je závislost komplexního modulu a úhlu fázového posunu. Blackův diagram je zaznamenán pro jednotlivá pojiva v grafu 3. Zobrazení silničního asfaltu i polymerem modifikovaného asfaltu má pro tyto druhy pojiv běžný charakteristický tvar. U polymerem modifikovaného asfaltu je vidět, že při komplexním modulu pod 1000 kPa se začne silně projevovat vliv modifikační přísady a úhel fázového posunu se začne snižovat (pružnější chování pojiva). Průběh Blackova diagramu silničního asfaltu se s rostoucí teplotou asymptoticky blíží k hodnotě úhlu fázového posunu 90 °, čili pojivo se blíží chování viskózní kapaliny.



Graf 3 Blackův diagram jednotlivých pojiv

S tvarem křivek asfaltů modifikovaných pryžovým granulátem v Blackově diagramu je doposud v odborné literatuře málo zkušeností. Je možné říct, že pryžový

granulát zajišťuje pojivu vyšší tuhost. Dále je možné vypořizovat, že s rostoucím obsahem pryžového granulátu roste pružnost CRmB, protože klesá úhel fázového posunu (zakřivení průběhu Blackova diagramu CRmB). To je výhodné z hlediska předpokládaného omezení vzniku trvalých deformací ve vozovce a omezení vzniku trhlin v případě použití takovýchto poživ v asfaltových směsích. Tvar (zakřivení tvaru S) průběhu Blackova diagramu ve sledovaném teplotně frekvenčním rozsahu se zdá být charakteristické pro asfalty modifikované pryžovými granuláty.

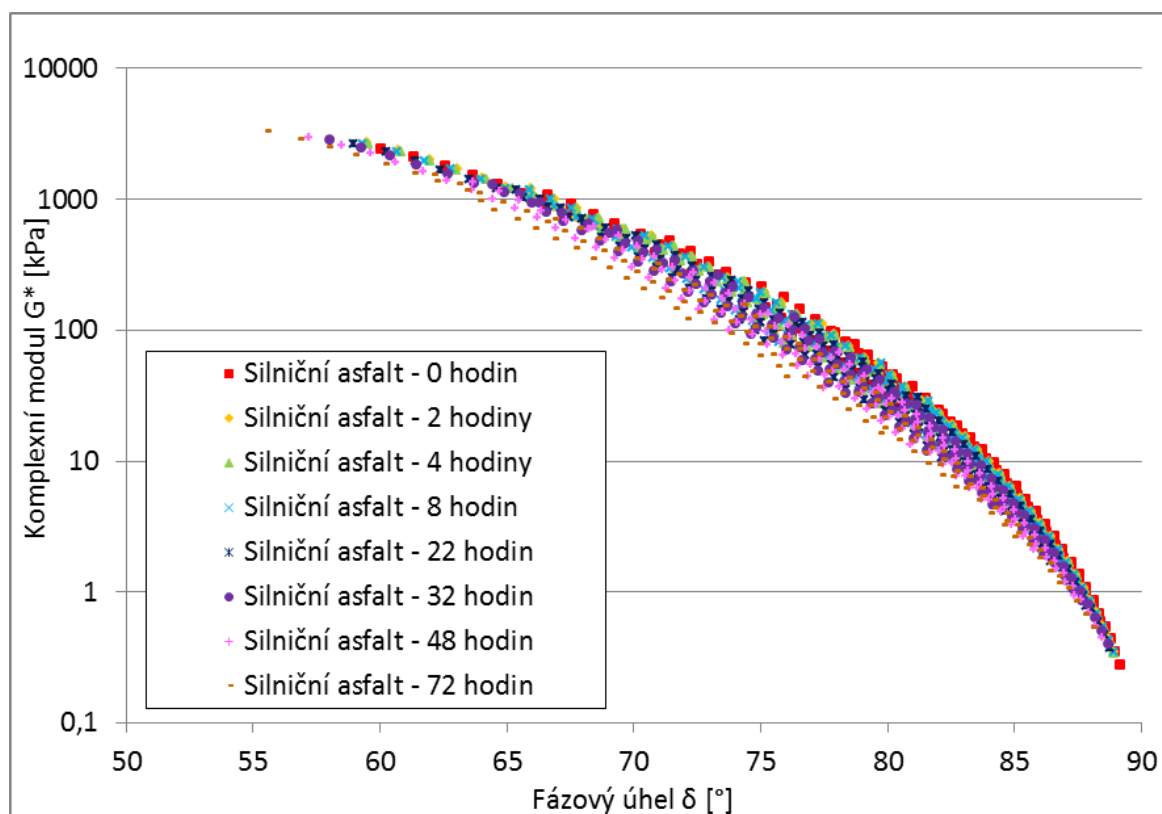
Pro popis vlivu zvýšené teploty na reologické vlastnosti CRmB byla jednotlivá pojiva na 72 hodin vložena v nádobách do laboratorní sušárny s teplotou 180 °C. V daných intervalech uložení poživ v laboratorní sušárně (0 hodin, 2 hodiny, 4 hodiny, 8 hodin, 22 hodin, 32 hodin 48 hodin a 72 hodin) byly odebírány vzorky poživ pro reologická měření. Z výsledků je patrný vliv vysoké teploty na změnu vlastností silničního asfaltu: penetrace se snížila o třetinu a bod měknutí vzrostl téměř o 5 °C. Bod měknutí polymerem modifikovaného asfaltu se překvapivě snížil, i když penetrace i dynamická viskozita mírně vzrostly. S rostoucím obsahem pryžového granulátu klesala hodnota penetrace a vzrůstala hodnota bodu měknutí, dynamické viskozity, resilience i vratné duktility. Vysoká teplota neměla na penetraci jehlou a resilienci CRmB přesvědčivý vliv, ale hodnota bodu měknutí všech CRmB se po 72 hodinách při teplotě 180 °C zvýšila, stejně jako hodnota dynamické viskozity a vratné duktility.

Komplexní modul silničního asfaltu s gradací 50/70 se s rostoucí dobou vystavení vysoké teplotě zvyšoval v celém frekvenčním rozsahu a fázový úhel se snižoval. Lze to vysvětlit termickým stárnutím poживa (zvyšování viskozity a křehnutí). Sklon hlavní křivky komplexního modulu polymerem modifikovaného asfaltu se s rostoucí dobou při teplotě 180 °C zmenšoval. Hodnoty hlavní křivky fázového úhlu polymerem modifikovaného asfaltu se nejprve ve své levé části zvyšovaly a po osmi hodinách při teplotě 180 °C se fázové úhly začaly snižovat. Lze tedy usuzovat, že zpočátku převládá vliv modifikační přísady a poté začne dominovat termické stárnutí základního asfaltu. Opačný vývoj hlavní křivky fázových úhlů prokázaly asfalty modifikované pryžovým granulátem. Fázové úhly se do 22 hodin snižovaly a poté se průběhy hlavních křivek fázových úhlů při nízkých frekvencích začaly opět zvyšovat. Hlavní křivky komplexních modulů CRmB vykazovaly přímý tvar a uložení poживa při vysoké teplotě se zdá málo významné pro tvar a polohu těchto křivek.

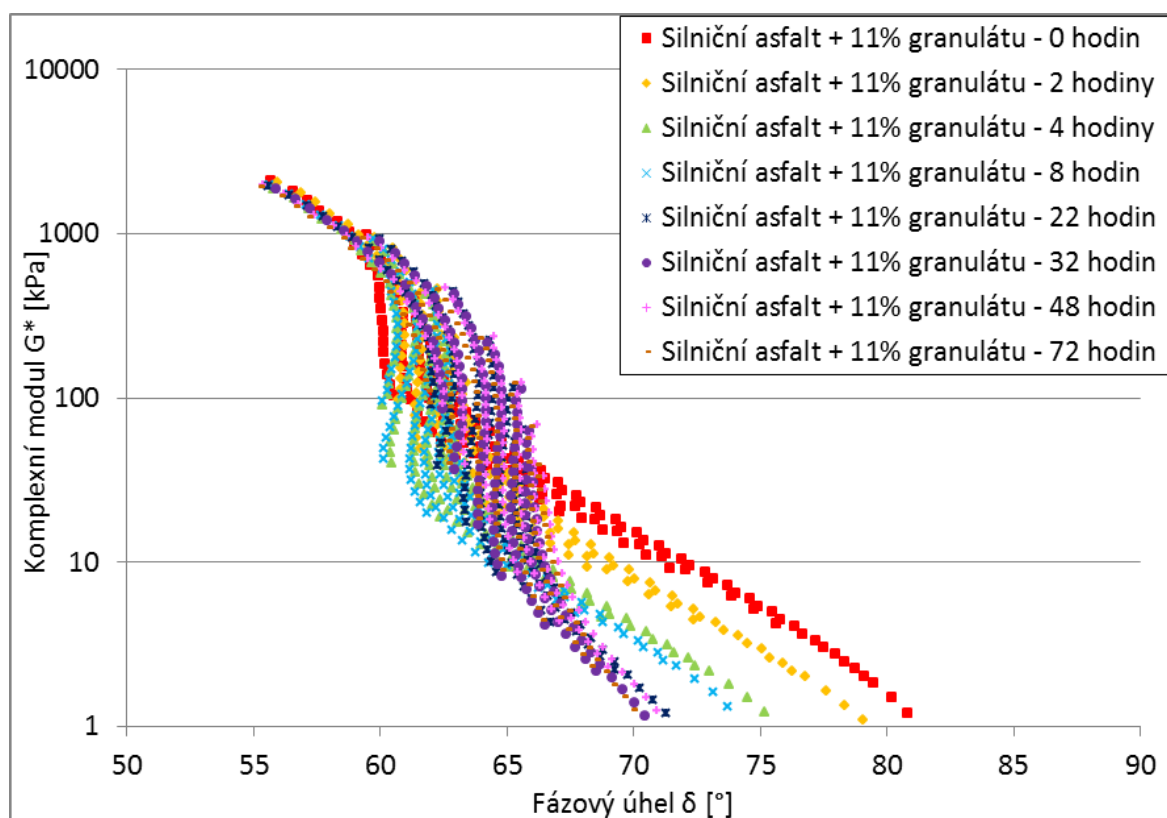
Na grafech 4 až 8 jsou zaznamenány Blackovy diagramy jednotlivých poživ v závislosti na době uložení při teplotě 180 °C. Vzhledem k tomu, že hlavní křivky komplexních modulů mají přímkový tvar, vykazuje tvar Blackových diagramů geometrickou podobnost s grafy hlavních křivek fázových úhlů jednotlivých poživ. Blackův diagram silničního asfaltu má obloukový tvar a dokladuje termické stárnutí poживa poklesem fázového úhlu s rostoucí dobou vystavení poживa vysoké teplotě. Blackův diagram polymerem modifikovaného asfaltu je shora ohraničen fázovým úhlem 71 ° a s prodlužující se dobou při vysoké teplotě se průběh posunuje k nižším fázovým úhlům, přičemž komplexní modul zůstává téměř nezměněn.

Fázové úhly asfaltů modifikovaných pryžovým granulátem se v části s nízkými komplexními moduly do 22 hodin stárnutí snižovaly a poté se průběhy hodnoty fázových úhlů Blackových diagramů začaly opět zvyšovat. Z toho lze odvodit, že CRmB v prvních 22 hodinách po vyrobení zlepšují při teplotě 180 °C své vlastnosti – dochází k doreagování asfaltu s pryžovým granulátem a ke zvyšování pružnosti pojiva. S dalším udržováním pojiva při vysoké teplotě už začne dominovat degradace pryžového granulátu a CRmB začne zhoršovat své vlastnosti, Blackův diagram se pozvolna začne přibližovat tvaru Blackova diagramu silničního asfaltu. Zaoblení tvaru „S“ Blackových diagramů CRmB se postupně posunuje směrem k nižším komplexním modulům a průběh Blackova diagramu s časem umístění v laboratorní sušárně rozšiřuje svůj průběh.

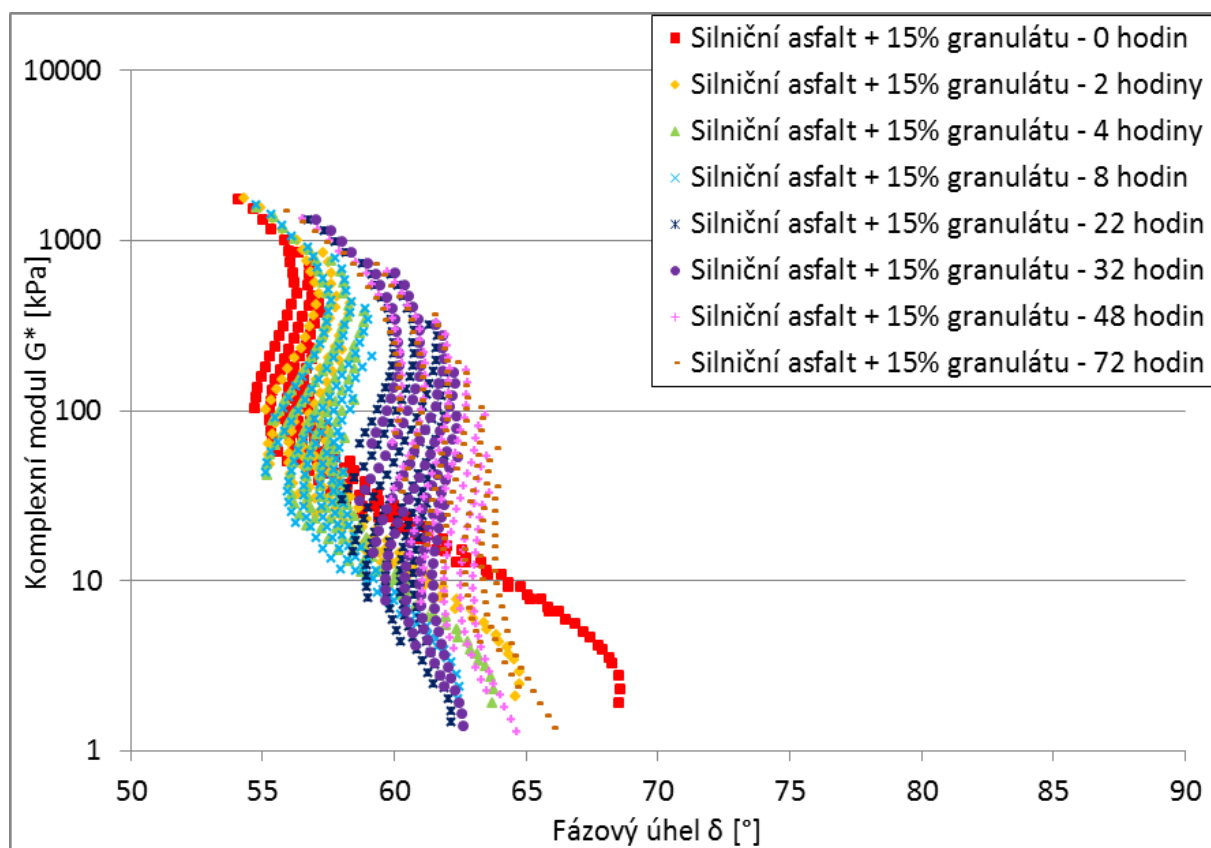
Pomocí měření komplexních modulů tuhosti a fázových úhlů na asfaltu modifikovaném pryžovým granulátem je možné sledovat vývoj reakce silničního asfaltu s pryžovým granulátem. Z naměřených dat je možné shrnout, že při teplotě 180 °C dochází přibližně po dobu 22 hodin k reakci silničního asfaltu s pryžovým granulátem a tudíž ke zlepšování vlastností CRmB (zvyšování pružnosti pojiva). Po této době již začne převládat degradace částic pryžového granulátu (devulkanizace a depolymerizace vysokou teplotou) a pojivo začne vykazovat zhoršování svých vlastností.



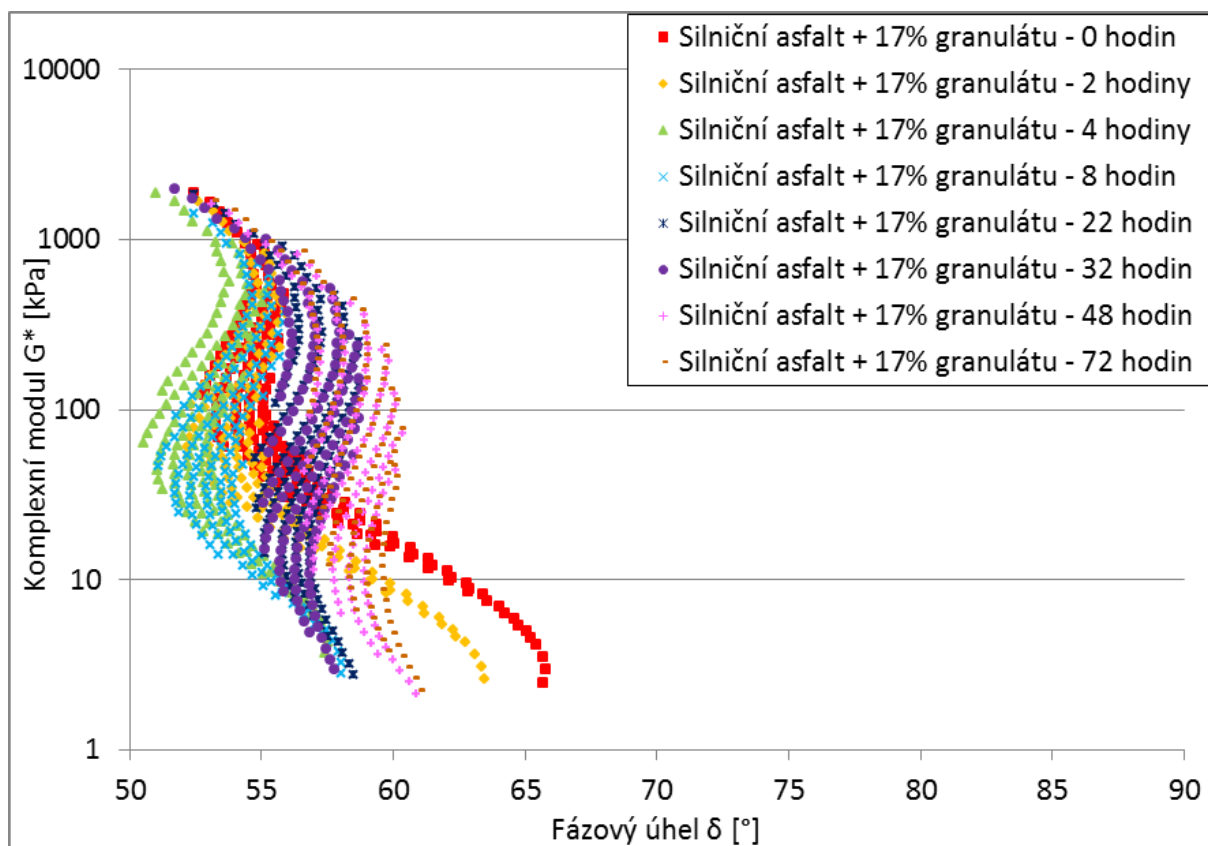
Graf 4 Vývoj Blackova diagramu silničního asfaltu gradace 50/70



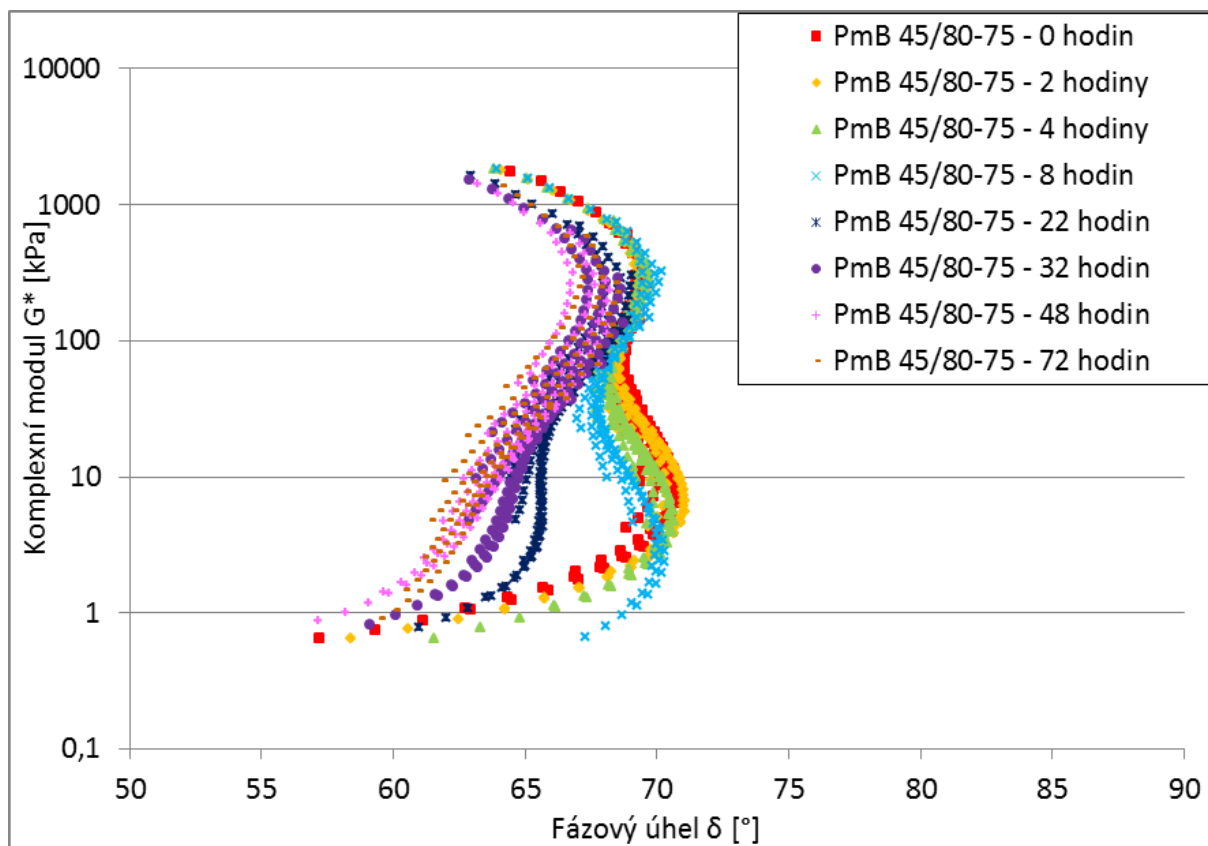
Graf 5 Vývoj Blackova diagramu CRmB obsahujícího 11 % pryžového granulátu



Graf 6 Vývoj Blackova diagramu CRmB obsahujícího 15 % pryžového granulátu



Graf 7 Vývoj Blackova diagramu CRmB obsahujícího 17 % pryžového granulátu



Graf 8 Vývoj Blackova diagramu polymerem modifikovaného asfaltu

Degradaci částic pryžového granulátu dokumentuje obrázek 3, kde je zachyceno srovnání zbytkového pryžového granulátu po extrakci asfaltu rozpouštědlem přes síto s nominální velikostí otvorů 0,09 mm. V levé části je vidět načechráný měkký granulát získaný po dvou hodinách působení teploty 180 °C a vpravo je ztvrdlý a spojený granulát získaný extrakcí asfaltu rozpouštědlem po 72 hodinách skladování při teplotě 180 °C. Kolem tohoto pryžového granulátu se nacházela vizkózní hmota, která sušením stmelila jednotlivá zrna. Fotografie dokumentují fyzikální změny pryže vznikající dlouhodobou interakcí s horkým asfaltem, což potvrzuje změna vlastností CRmB v průběhu jejich skladování při vysokých teplotách.



Obr. 3 Srovnání části zbytkového granulátu po extrakci asfaltu rozpouštědlem (vlevo po 2 hodinách a vpravo po 72 hodinách při teplotě 180 °C)

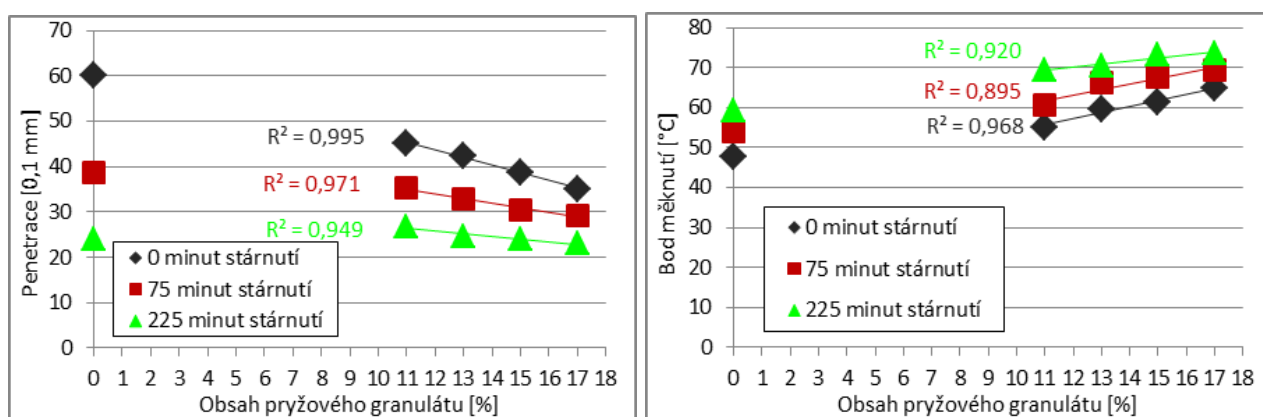
5.3 ODOLNOST CRmB PROTI STÁRNUTÍ VLIVEM TEPLA A VZDUCHU

Pojiva popsaná v odstavci 5.2 byla podrobena stárnutí kombinovaným účinkem tepla a vzduchu modifikovanou zkouškou tepelné stálosti v tenké pohybujiící se vrstvě (Rolling Thin Film Oven Test – RTFOT) podle normy ČSN EN 12607-1.

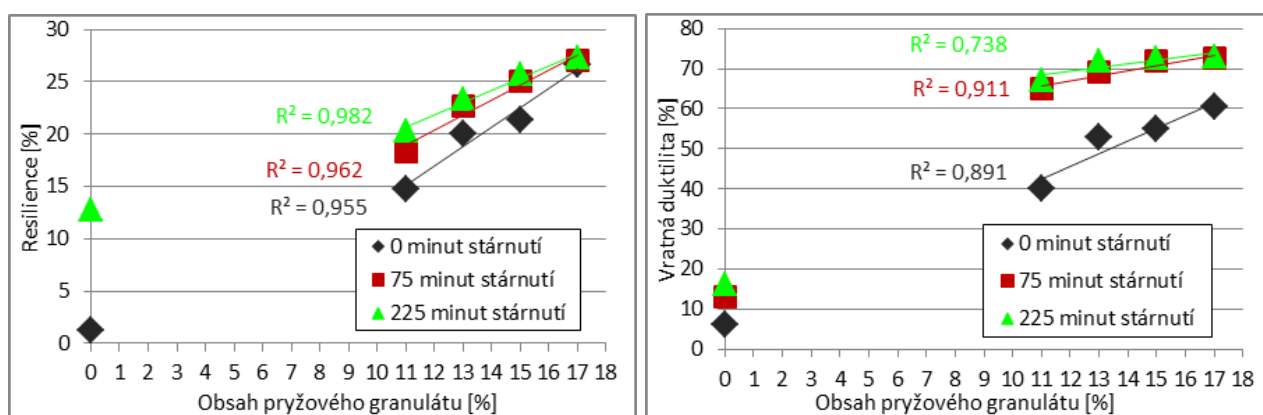
Kromě běžných podmínek zkoušky stárnutí (75 minut při teplotě 163 °C ± 1 °C s přívodem vzduchu 4,0 l/minutu ± 0,2 l/minutu) byla na pojiva aplikována trojnásobná doba stárnutí (225 minut), aby bylo možné popsat vývoj stárnutí v čase. Na nezestárých i zestárých pojivech byly provedeny zkoušky penetrace jehlou, bodu měknutí, penetrace a pružné regenerace (resilience), vratné duktility a zjištěny reologické vlastnosti v DSR.

Nejvyšší hodnotu penetrace jehlou vykazoval silniční asfalt bez přídavku pryžového granulátu a pak také polymerem modifikovaný asfalt. Se zvyšujícím se obsahem pryžového granulátu klesá hodnota penetrace, což svědčí o zvyšování viskozity pojiva. Rovněž s rostoucí dobou stárnutí se snižuje hodnota penetrace všech pojiv. Nejvyšší hodnotu bodu měknutí dosahoval nezestárlý polymerem modifikovaný asfalt, přičemž se hodnota bodu měknutí se stárnutím snižovala, na rozdíl od bodu měknutí ostatních pojiv. S rostoucím obsahem pryžového granulátu v CRmB docházelo k nárůstu hodnoty bodu měknutí, což opět souvisí s nárůstem viskozity pojiva. Přídavek pryžového granulátu omezil zvýšení hodnoty bodu měknutí zapříčiněné stárnutím RTFOT.

Hodnota penetrace a pružné regenerace – resilience jednotlivých CRmB silně závisela na obsahu pryžového granulátu. Schopnost pojiva vrátit se do původního stavu (pružnost) roste s množstvím pryžového granulátu. S rostoucím obsahem pryžového granulátu mělo navíc stárnutí na hodnotu resilience klesající vliv. Resilience silničního asfaltu byla nízká, protože toto pojivo neobsahuje žádnou modifikační přísadu. Resilience polymerem modifikovaného pojiva byla rovněž spíše nízká, což je pravděpodobně způsobeno jeho nízkou „tvrdostí“, čili viskozitou. To potvrzuje pozvolné zvyšování hodnoty resilience se stárnutím (zvyšováním viskozity) u všech pojiv. V případě CRmB dochází působením vysoké teploty k doreagování pryžového granulátu s asfaltem a navíc asfaltová fáze pojiva stárnutím zvyšuje svou viskozitu a křehne, což souvisí se snižováním viskózních vlastností a zvyšováním elastických vlastností (pružnosti) pojiva. Podobný vývoj v čase stárnutí vykazovala zkouška vratné duktility CRmB.



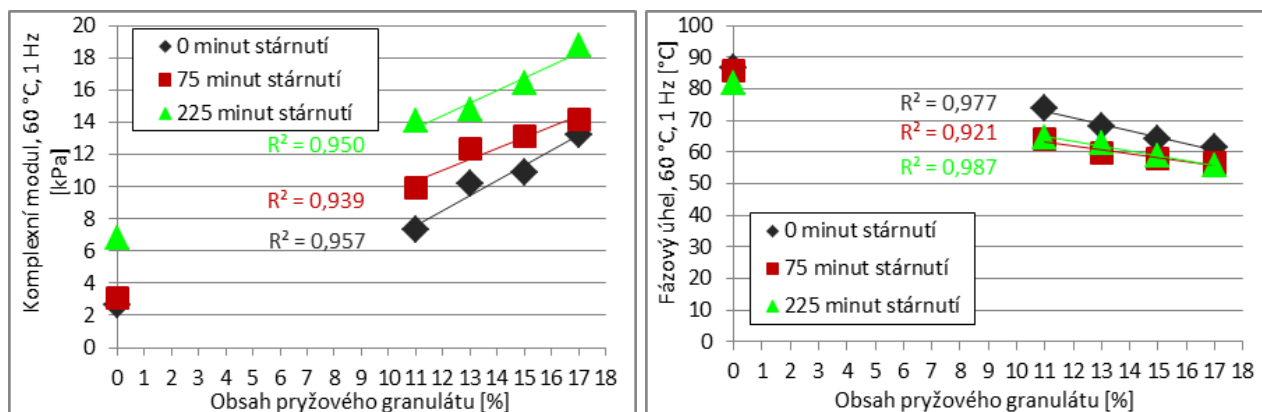
Graf 9: Penetrace jehlou a bod měknutí CRmB v závislosti na obsahu pryžového granulátu



Graf 10: Resilience a vratná duktilita CRmB v závislosti na obsahu pryžového granulátu

S rostoucí dobou stárnutí se zvyšuje komplexní smykový modul všech pojiv určený při teplotě 60 °C a frekvenci zatěžování 1 Hz. Komplexní modul silničního asfaltu se po 225 minutách stárnutí zvýšil 2,6krát, zatímco modul polymerem modifikovaného asfaltu pouze 1,8krát. Zvýšení obsahu pryžového granulátu v CRmB vede k omezení zvýšení komplexního modulu zapříčiněné stárnutím:

komplexní modul CRmB s 11 % pryžového granulátu se 225 minutovým stárnutím zvýšil 1,9krát, modul CRmB s 13 % i 15 % pryžového granulátu 1,5krát a modul CRmB se 17 % pryžového granulátu 1,4krát.



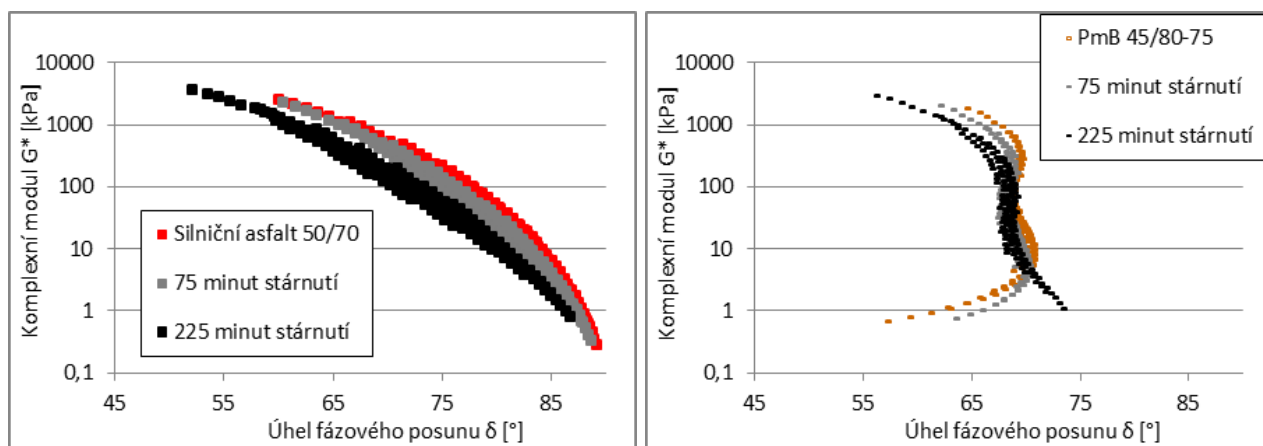
Graf 11: Komplexní modul a fázový úhel CRmB při teplotě 60 °C a frekvenci zatěžování 1 Hz v závislosti na obsahu pryžového granulátu

Fázový úhel polymerem modifikovaného asfaltu se s rostoucí dobou stárnutí metodou RTFOT téměř neměnil a fázový úhel silničního asfaltu se po 225 minutách stárnutí snížil z původní hodnoty o 5 %. Fázový úhel asfaltů modifikovaných pryžovým granulátem se nejvíce snížil v prvních 75 minutách stárnutí, přičemž následujících 150 minut stárnutí mělo na fázový úhel zanedbatelný vliv.

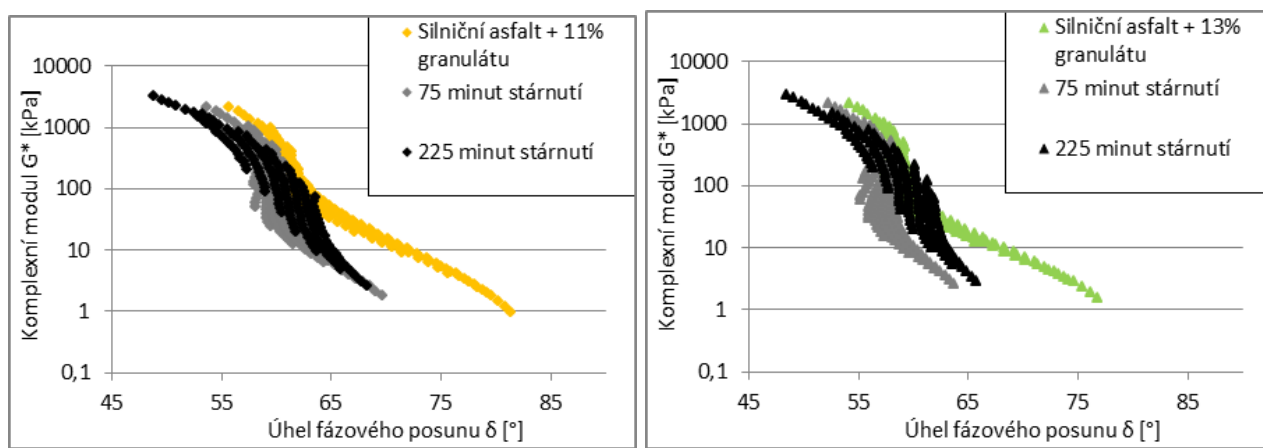
V grafech 9 až 11 je zachycen vliv obsahu pryžového granulátu v CRmB na výsledky zkoušek penetrace jehlou, bodu měknutí, resilience, vratné duktility a na výsledky reologických měření (komplexní modul a fázový úhel při teplotě 60 °C a frekvenci zatěžování 1 Hz) pro nezestárnutá i zestárnutá pojiva postupem RTFOT.

Z grafů je patrné, že s rostoucím dávkováním pryžového granulátu roste viskozita pojiv (klesá hodnota penetrace, roste hodnota bodu měknutí i komplexní modul) a posiluje se pružné chování (roste resilience a vratná duktilita a klesá fázový úhel).

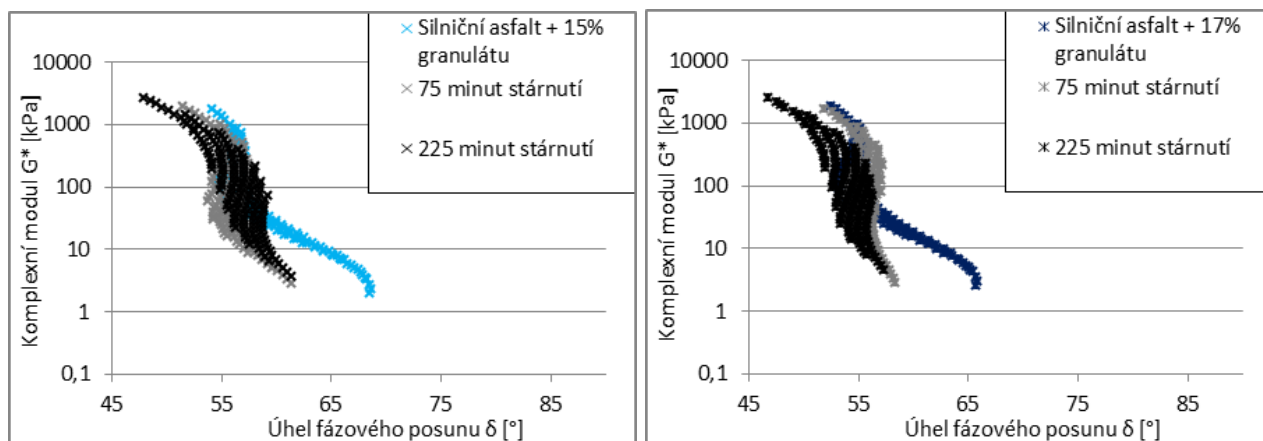
Na grafech 12 až 14 je zachyceno stárnutí jednotlivých pojiv vlivem tepla a vzduchu pomocí Blackových diagramů. Silniční asfalt dosahuje stárnutím snížení fázového úhlu a zvýšení komplexního smykového modulu. Snížení fázového úhlu je výraznější při nízkých teplotách (vysoká tuhost) než při vysokých teplotách. Lze to vysvětlit oxidativním stárnutím silničního asfaltu. Vliv stárnutí modifikovaných pojiv se liší od projevů stárnutí nemodifikovaných silničních asfaltů. Blackovy diagramy ukazují složitou povahu binárních systémů (asfalt + modifikační přísada). V porovnání se silničním asfaltem prokázala nezestárlá modifikovaná pojiva zvýšené komplexní smykové moduly a zároveň snížené fázové úhly při vyšších teplotách. V průběhu stárnutí polymerem modifikovaný asfalt částečně ztrácí elastický příspěvek modifikační přísady při vyšších teplotách (posun Blackova diagramu doleva), ale přesto si pojivo ponechává znatelně pružnější chování oproti silničnímu asfaltu.



Graf 12: Blackův diagram silničního asfaltu a polymerem modifikovaného asfaltu



Graf 13: Blackův diagram CRmB s 11 % pryžového granulátu a 13 % granulátu



Graf 14: Blackův diagram CRmB s 15 % pryžového granulátu a 17 % granulátu

Asfalty modifikované pryžovým granulátem stárnutím dosáhly zvýšení komplexních smykových modulů, ale také dalšího snížení fázových úhlů, což svědčí o dodatečné reakci s pryžovým granulátem při vysoké teplotě. Lze předpokládat, že s delší dobou stárnutí metodou RTFOT by fázové úhly již vzrůstaly. Při nízkých teplotách došlo oxidačním stárnutím u všech pojiv k poklesu fázového úhlu.

Z reologických měření a zkoušek stárnutí CRmB je patrné, že působením vysoké teploty (např. během míchání či opětovného zahřívání) dochází k výrazným změnám jejich vlastností, které jsou způsobeny dobíhající reakcí pryžového granulátu s asfaltem. Stárnutím dochází k tvrdnutí pojiva (zvyšování viskozity), což reflektuje snížení hodnot penetrace jehlou a zvýšení komplexního modulu. Zvýšení obsahu pryžového granulátu v CRmB vede k nárůstu hodnoty resilience – pryžový granulát tak slouží jako částečný antioxidant, jeho přidáním se zpomaluje degradace vlivem působení vysoké teploty. Z těchto závěrů je možné usuzovat, že pryžový granulát omezuje stárnutí asfaltových pojiv. Stárnutí metodou RTFOT se ukázalo být významným ukazatelem citlivosti pojiv na degradaci způsobenou zahříváním pojiv na vysokou teplotu. Během prvních 75 minut stárnutí dochází k daleko výraznějším změnám než při dlouhodobějším stárnutí, delší zahřívání nemá na výsledky zkoušek pojiv tak výrazný vliv.

Stárnutí asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem při zkoušce RTFOT bylo oproti silničnímu asfaltu a polymerem modifikovanému asfaltu nápadně odlišné. Silniční asfalt výrazně stárnul, pojivo se stávalo viskóznější a tvrdší. Silniční asfalt 50/70 po standardní době stárnutí (75 minut) dosáhl vlastností asfaltu o tři druhy nižší (30/45), byly ovšem dodrženy požadavky ČSN EN 12591 pro toto stárnutí. Delší stárnutí již snížilo druh asfaltu na gradaci 20/30.

6 VLASTNOSTI ASFALTOVÝCH SMĚSÍ S CRmB

CRmB je možné použít ve všech běžně vyráběných asfaltových směsích (zejm. asfaltových betonech, asfaltových kobercích mastixových, asfaltových kobercích drenážních nebo asfaltových betonech pro velmi tenké vrstvy). Je ovšem nezbytně nutné upravit návrh asfaltové směsi tak, aby bylo umožněno začlenění částic pryže do kostry asfaltové směsi. Prakticky to znamená zvýšit mezerovitost směsi kameniva vypuštěním části fileru a drobného kameniva, popřípadě navrhnout asfaltovou směs s přerušenou nebo otevřenou zrnitostí kameniva. Z důvodu vyšší viskozity pojiva a přítomnosti částic pryže je nutné zvýšit obsah pojiva v asfaltové směsi.

6.1 VÝBĚR ASFALTOVÝCH SMĚSÍ S CRmB PRO LABORATORNÍ ZKOUŠKY

Výběr asfaltových směsí byl proveden tak, aby bylo možné do sestavovaného technického předpisu správně nastavit požadované parametry jednotlivých asfaltových směsí, upřesnit požadavky na jednotlivé asfaltové směsi uvedené v odpovídajících normách řady ČSN EN 13108, popsat odlišnosti oproti asfaltovým směsím s konvenčními asfaltovými pojivy a ověřit laboratorní vlastnosti asfaltových směsí. Návrhy vybraných asfaltových směsí poskytly podklad pro počáteční zkoušky typu (ITT dle ČSN EN 13108-20) jednotlivých pokusných úseků. Na asfaltových směsích byly provedeny zkoušky odolnosti vůči vzniku trvalých deformací zkouškou pojíždění kolem dle ČSN EN 12697-22+A1, zkouška odolnosti zkušebních těles vůči vodě dle ČSN EN 12697-12, zkouška nízkoteplotních

vlastností a tvorba trhlin pomocí jednoosé zkoušky tahem dle ČSN EN 12697-46, tuhost dle ČSN EN 12697-26, odolnost vůči únavě dle ČSN EN 12697-24+A1 a ztráta částic zkušebních těles asfaltového koberce drenážního podle ČSN EN 12697-17+A1. Pro srovnání výsledků zkoušek asfaltových směsí s CRmB byla vyrobena běžná srovnávací směs asfaltového betonu pro obrusné vrstvy se zrnitostí do 11 mm (1) ACO 11 S 70/100 s konvenčním pojivem (silniční asfalt gradace 70/100).

Základní údaje o použitých materiálech, složeních a volumetrických charakteristikách jednotlivých asfaltových směsí jsou uvedeny v tabulce 3. Na základě rešerše zahraniční literatury a všeobecně platných doporučení byly provedeny návrhy čáry zrnitosti jednotlivých asfaltových směsí, které jsou souhrnně uvedeny v tabulce 2.

Tab. 2 Číselné vyjádření čar zrnitosti kameniva jednotlivých asfaltových směsí

| Druh směsi | Propady na jednotlivých sítích v % [mm] | | | | | | | | | | |
|---------------------|---|-----|-----|-----|----|----|----|-----|------|-------|-------|
| | 22 | 16 | 11 | 8 | 4 | 2 | 1 | 0,5 | 0,25 | 0,125 | 0,063 |
| (1) ACO 11 S 70/100 | 100 | 100 | 96 | 72 | 43 | 30 | 20 | 12 | 7 | 5 | 3,6 |
| (2) ACO 11 CRmB | 100 | 100 | 95 | 72 | 39 | 27 | 18 | 10 | 6 | 4 | 2,8 |
| (3) ACO 11 CRmB | 100 | 100 | 95 | 55 | 27 | 21 | 15 | 12 | 10 | 9 | 8,2 |
| (4) ACL 16 CRmB | 100 | 99 | 71 | 60 | 36 | 27 | 20 | 15 | 10 | 6 | 3,7 |
| (5) ACL 16 CRmB | 100 | 99 | 71 | 60 | 36 | 27 | 20 | 15 | 10 | 6 | 3,7 |
| (6) BBTM 5 A CRmB | 100 | 100 | 100 | 100 | 80 | 36 | 26 | 20 | 14 | 9 | 7,6 |
| (7) BBTM 5 B CRmB | 100 | 100 | 100 | 100 | 75 | 24 | 18 | 14 | 10 | 7 | 6,3 |
| (8) BBTM 8 B CRmB | 100 | 100 | 100 | 95 | 30 | 20 | 13 | 8 | 5 | 3 | 2,5 |
| (9) BBTM 11 A CRmB | 100 | 100 | 97 | 62 | 33 | 19 | 12 | 8 | 6 | 4 | 3,5 |
| (10) PA 8 CRmB | 100 | 100 | 100 | 94 | 14 | 8 | 6 | 4 | 3 | 2 | 1,9 |
| (11) PA 8 CRmB | 100 | 100 | 100 | 94 | 14 | 8 | 6 | 4 | 3 | 2 | 1,9 |
| (12) PA 8 CRmB | 100 | 100 | 100 | 97 | 25 | 14 | 9 | 7 | 6 | 5 | 3,3 |
| (13) PA 8 CRmB | 100 | 100 | 100 | 97 | 25 | 14 | 9 | 7 | 6 | 5 | 3,3 |
| (14) PA 8 CRmB | 100 | 100 | 100 | 88 | 20 | 13 | 10 | 9 | 7 | 5 | 3,2 |
| (15) PA 11 CRmB | 100 | 100 | 82 | 29 | 12 | 8 | 7 | 6 | 5 | 3 | 2,6 |
| (16) SMA 8 CRmB | 100 | 100 | 100 | 96 | 35 | 27 | 22 | 18 | 14 | 10 | 7,3 |
| (17) SMA LA 8 CRmB | 100 | 100 | 100 | 94 | 22 | 16 | 13 | 11 | 10 | 7 | 5,7 |
| (18) SMA 16 CRmB | 100 | 98 | 68 | 44 | 24 | 22 | 19 | 17 | 14 | 10 | 7,5 |
| (19) SAL 5 CRmB | 100 | 100 | 100 | 100 | 93 | 41 | 30 | 24 | 18 | 11 | 7,5 |
| (20) SAL 5 CRmB | 100 | 100 | 100 | 100 | 93 | 40 | 28 | 21 | 15 | 8 | 5,0 |
| (21) SAL 5 CRmB | 100 | 100 | 100 | 100 | 93 | 40 | 28 | 21 | 15 | 8 | 5,0 |
| (22) SAL 5 CRmB | 100 | 100 | 100 | 100 | 84 | 65 | 49 | 38 | 27 | 17 | 10,6 |
| (23) SAL 8 CRmB | 100 | 100 | 100 | 97 | 44 | 33 | 25 | 19 | 14 | 10 | 5,5 |

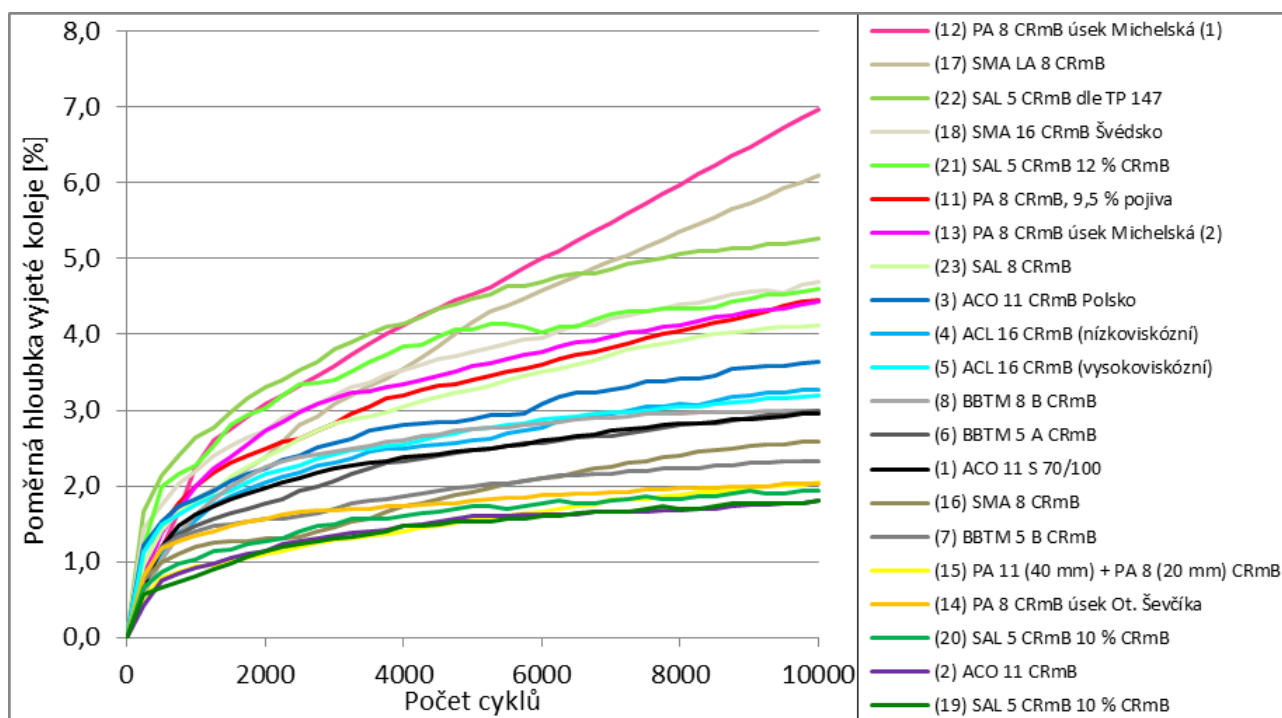
Tab. 3 Základní údaje o jednotlivých asfaltových směsích

| Druh směsi | Výroba směsi | Filer | Kamenivo | Asfalt | Prýžový granulát | Typ CRmB | Obsah pojiva [%] | Mezerovitost [%] | VMA [%] | VFB [%] | Tloušťka asfaltového filmu [10 ⁻³ mm] |
|---------------------|--------------|----------------|-----------|----------------|------------------|---------------|------------------|------------------|---------|---------|--|
| (1) ACO 11 S 70/100 | Laboratoř | Mokrá | Luleč | OMV 50/70 | - | - | 6,2 | 3,9 | 18,1 | 78,5 | 9,89 |
| (2) ACO 11 CRmB | Laboratoř | Mokrá | Luleč | OMV 50/70 | Montstav 0/1 | Vyskoviskózní | 8,5 | 3,1 | 21,6 | 85,7 | 16,70 |
| (3) ACO 11 CRmB | Obalovna | Vápenec | amfibolit | 30/50 | 0/1 mm | Nízkoviskózní | 5,3 | 7,4 | 20,3 | 64,0 | 4,36 |
| (4) ACL 16 CRmB | Laboratoř | Mokrá | Luleč | OMV 50/70 | Montstav 0/1 | Nízkoviskózní | 5,8 | 7,3 | 20,1 | 63,7 | 8,57 |
| (5) ACL 16 CRmB | Laboratoř | Mokrá | Luleč | OMV 50/70 | Montstav 0/1 | Vyskoviskózní | 5,8 | 6,6 | 19,5 | 66,0 | 8,57 |
| (6) BBTM 5 A CRmB | Laboratoř | Mokrá | Luleč | OMV 50/70 | Kovosteel 0/1 | Vyskoviskózní | 8,2 | 7,6 | 25,0 | 69,7 | 6,50 |
| (7) BBTM 5 B CRmB | Laboratoř | Mokrá | Luleč | OMV 50/70 | Kovosteel 0/1 | Vyskoviskózní | 8,2 | 11,4 | 28,1 | 59,5 | 7,82 |
| (8) BBTM 8 B CRmB | Laboratoř | Mokrá | Luleč | OMV 50/70 | Montstav 0/1 | Vyskoviskózní | 8,5 | 6,3 | 24,2 | 73,9 | 18,90 |
| (9) BBTM 11 A CRmB | Obalovna | Čertovy Schody | Bytíz | Litvínov 50/70 | Darta 0/1,4 | Vyskoviskózní | 8,3 | 5,5 | 24,1 | 77,1 | 14,30 |
| (10) PA 8 CRmB | Laboratoř | Mokrá | Luleč | OMV 50/70 | Montstav 0/1 | Vyskoviskózní | 8,5 | 22,0 | 36,9 | 40,5 | 26,18 |
| (11) PA 8 CRmB | Laboratoř | Mokrá | Luleč | OMV 50/70 | Montstav 0/1 | Vyskoviskózní | 9,5 | 19,0 | 36,0 | 47,3 | 29,58 |
| (12) PA 8 CRmB | Obalovna | Čertovy Schody | Bytíz | Litvínov 50/70 | Montstav 0/1 | Vyskoviskózní | 8,7 | 18,3 | 34,9 | 47,6 | 15,90 |
| (13) PA 8 CRmB | Obalovna | Čertovy Schody | Bytíz | Litvínov 50/70 | Montstav 0/1 | Vyskoviskózní | 8,7 | 18,3 | 34,9 | 47,6 | 15,90 |
| (14) PA 8 CRmB | Obalovna | Mokrá | Luleč | OMV 50/70 | Kovosteel 0/1 | Vyskoviskózní | 8,0 | 15,5 | 31,0 | 49,9 | 14,75 |
| (15) PA 11 CRmB | Laboratoř | Mokrá | Luleč | Litvínov 50/70 | Montstav 0/1 | Vyskoviskózní | 6,5 | 23,7 | 35,4 | 32,9 | 15,58 |
| (16) SMA 8 CRmB | Laboratoř | Mokrá | Luleč | OMV 50/70 | Kovosteel 0/1 | Vyskoviskózní | 7,0 | 6,7 | 22,0 | 69,6 | 6,04 |
| (17) SMA LA 8 CRmB | Laboratoř | Mokrá | Luleč | OMV 50/70 | Kovosteel 0/1 | Nízkoviskózní | 6,6 | 20,2 | 32,5 | 37,9 | 7,38 |
| (18) SMA 16 CRmB | Obalovna | Vápenec | žula | 70/100 | 0/1 mm | Vyskoviskózní | 8,7 | 2,4 | 22,1 | 89,0 | 7,70 |
| (19) SAL 5 CRmB | Laboratoř | Mokrá | Luleč | OMV 50/70 | Kovosteel 0/1 | Vyskoviskózní | 10,0 | 3,6 | 25,1 | 85,7 | 7,71 |
| (20) SAL 5 CRmB | Laboratoř | Mokrá | Luleč | OMV 50/70 | Kovosteel 0/1 | Vyskoviskózní | 10,0 | 6,7 | 27,6 | 75,9 | 10,32 |
| (21) SAL 5 CRmB | Laboratoř | Mokrá | Luleč | OMV 50/70 | Kovosteel 0/1 | Vyskoviskózní | 12,0 | 4,0 | 29,2 | 86,2 | 12,66 |
| (22) SAL 5 CRmB | Laboratoř | Mokrá | Luleč | OMV 50/70 | Kovosteel 0/1 | Vyskoviskózní | 10,0 | 2,8 | 24,6 | 88,5 | 5,70 |
| (23) SAL 8 CRmB | Laboratoř | Kunčice | Žumberk | OMV 50/70 | Kovosteel 0/1 | Vyskoviskózní | 9,5 | 2,0 | 23,8 | 91,7 | 10,19 |

6.2 ODOLNOST VŮČI VZNIKU TRVALÝCH DEFORMACÍ

Z důvodu vysokého obsahu pojiva v asfaltových směsích s CRmB bylo nutné ověřit odolnost navržených asfaltových směsí vůči vzniku trvalých deformací. Odolnost vůči vzniku trvalých deformací byla určena zkouškou pojíždění kolem postupem uvedeným v ČSN EN 12697-22+A1 v malém zkušebním zařízení na vzduchu při konstantní teplotě 50 °C. Závislost poměrné hloubky vyjetých kolejí na počtu zatěžovacích cyklů je uvedena v grafu 15. V legendě grafu jsou čáry seřazeny sestupně podle hodnoty trvalé deformace po 10 000 zatěžovacích cyklech.

Skupina směsí asfaltového betonu pro velmi tenké vrstvy vykázala v průměru nejvyšší odolnost vůči vzniku deformace (nejnižší průměr hodnot WTS_{AIR} i PRD_{AIR}). Nejhorší odolnost vůči deformaci prokázala skupina směsí asfaltového koberce mastixového, která je ovšem ovlivněna výsledkem asfaltové směsi (17) SMA LA 8 CRmB s poměrně vysokou mezerovitostí, která byla hutněna při nízké teplotě (135 °C). Srovnávací asfaltová směs (1) ACO 11 S 70/100 dosahovala průměrnou odolnost vůči vzniku trvalé deformace. I přes vyšší obsah pojiva v asfaltových směsích s CRmB, než je běžné u konvenčních asfaltových směsí, prokázaly tyto asfaltové směsi dostatečnou odolnost vůči vzniku trvalých deformací.



Graf 15: Průběh poměrné hloubky vyjeté koleje jednotlivých asfaltových směsí

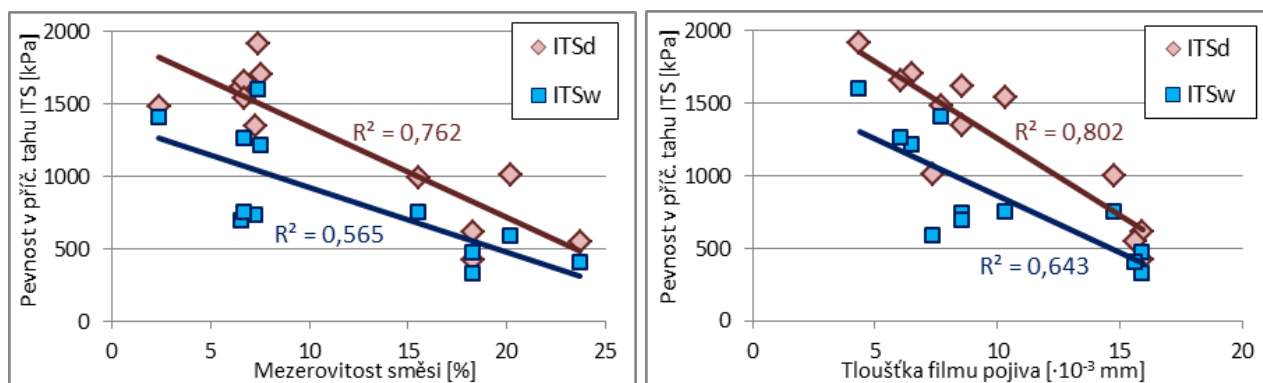
6.3 ODOLNOST ZKUŠEBNÍCH TĚLES VŮČI VODĚ

Odolnost asfaltové směsi vůči vodě byla zjišťována podle normy ČSN EN 12697-12 metodou A. Výsledkem zkoušky je poměr pevnosti v příčném tahu skupiny mokrých ITS_w těles k pevnosti v příčném tahu stanovené na skupině suchých těles ITS_d vyjádřený v procentech (hodnota $ITSR$).

Asfaltové směsi s CRmB dosahují spíše nízkých odolností zkušebních těles vůči vodě. Pouze tři asfaltové směsi s CRmB dosáhly vyšší hodnoty ITSR než 80 % ((3) ACO 11 CRmB, (9) BBTM 11 A CRmB a (18) SMA 16 CRmB), přičemž poslední z nich navíc obsahovala adhezní přísadu a tudíž asfaltová směs vykazovala nejvyšší hodnotu parametru ITSR. Srovnávací asfaltová směs dosáhla rovněž hodnoty ITSR vyšší než 80 %. Hodnotu 70 % ITSR přesáhlo celkem 12 asfaltových směsí s CRmB ze 17 zkoušených. Nejvyšší průměrnou hodnotu ITSR dosáhla skupina směsí asfaltového betonu pro velmi tenké vrstvy a asfaltového koberce drenážního.

I přesto, že se jedná o značně odlišné asfaltové směsi, bylo možné vypožorovat závislost pevností v příčném tahu suchých i mokrých těles na mezerovitosti jednotlivých asfaltových směsí při zkušební teplotě 15 °C, což je vidět v grafu 16. Protože teoretická tloušťka filmu pojiva na povrchu kameniva má při návrhu asfaltové směsi úzký vztah k mezerovitosti, bylo možné vysledovat závislost pevnosti v příčném tahu i na tloušťce filmu pojiva. Na hodnotu parametru ITSR neměla mezerovitost ani teoretická tloušťka filmu pojiva na povrchu kameniva jednotlivých asfaltových směsí prokazatelný vliv.

Z důvodu velké tloušťky CRmB na povrchu kameniva je – stejně jako v případě směsí asfaltového koberce mastixového – hodnota ITSR pro asfaltové směsi s CRmB neprůkazná a tudíž dostatečně nevystihuje reálnou odolnost asfaltové směsi vůči působení vody.



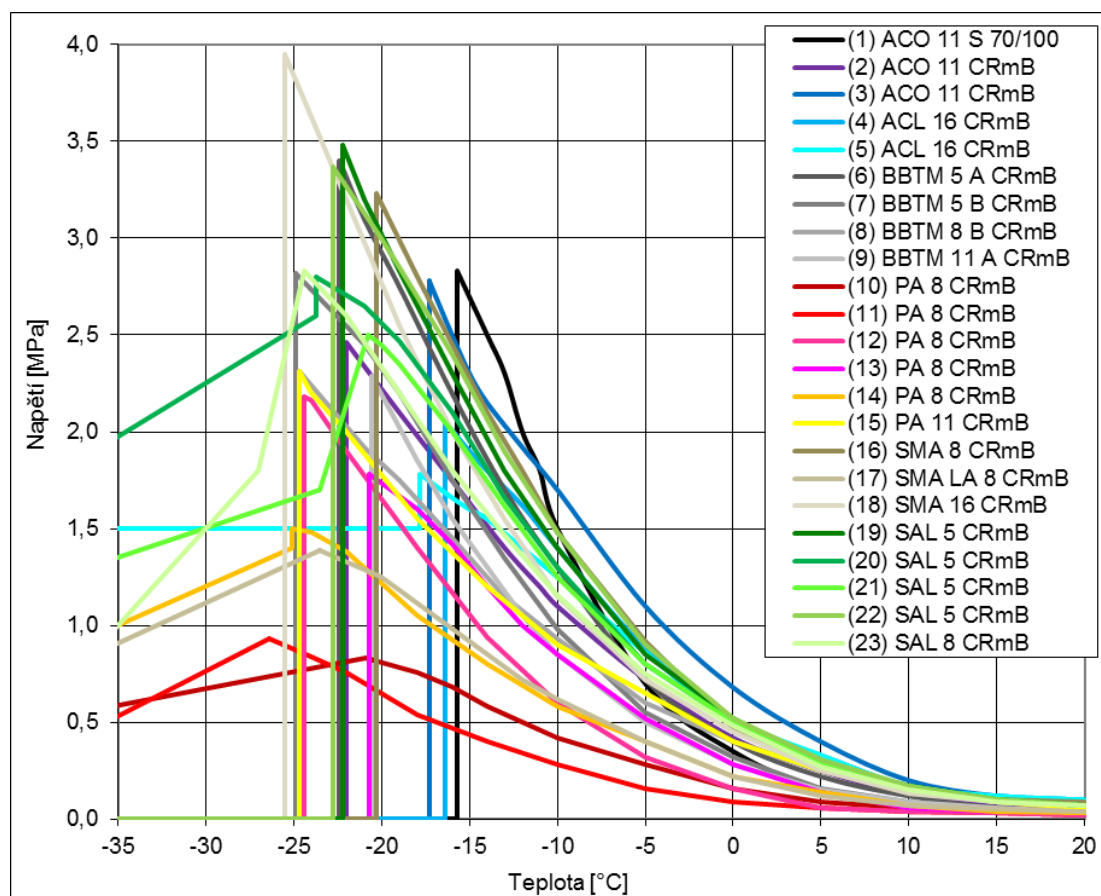
Graf 16: Vliv mezerovitosti a tloušťky filmu pojiva jednotlivých asfaltových směsí na pevnost v příčném tahu skupiny suchých i mokrých těles při teplotě 15 °C

6.4 NÍZKOTEPLTNÍ VLASTNOSTI A TVORBA TRHLIN

V grafu 17 jsou shrnuty výsledky zkoušky nízkoteplotních charakteristik – závislosti tahového napětí na klesající teplotě jednotlivých zkušebních těles. V případě asfaltových směsí s CRmB někdy při zkoušce nedojde k porušení křehkým lomem (trhlinou), pouze poklesne tahové napětí a dojde k přerozdělení a relaxaci vnitřního napětí ve zkušebním tělese.

Při sledování závislosti volumetrických parametrů jednotlivých asfaltových směsí a nízkoteplotních charakteristik byla nalezena slabá závislost kritického napětí na tloušťce asfaltového filmu a na mezerovitosti asfaltových směsí (korelační koeficient R^2 byl v obou případech mírně vyšší než 0,5). Při zvětšování tloušťky

asfaltového filmu na povrchu kameniva a při snižování mezerovitosti se zvyšuje hodnota kritického napětí.



Graf 17: Souhrnné srovnání průměrných průběhů nízkoteplotních charakteristik

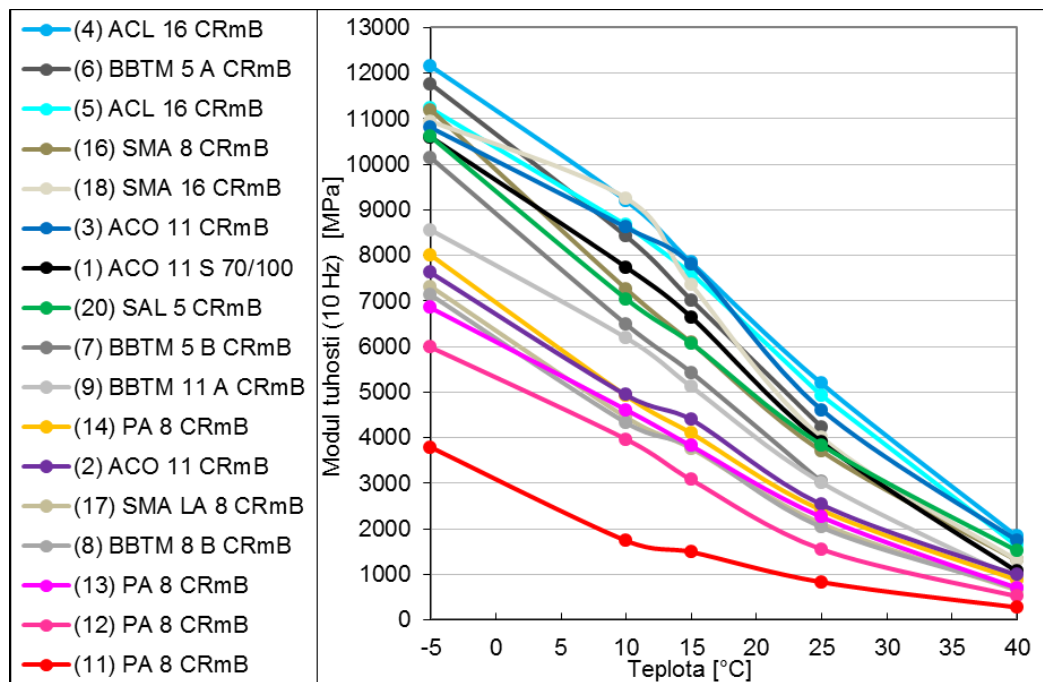
Asfaltové směsi vykazovaly kritickou teplotu v rozmezí $-15,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $-26,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, přičemž v případě asfaltových směsí (5) ACL 16 CRmB, (10) PA 8 CRmB, (11) PA 8 CRmB, (14) PA 8 CRmB, (17) SMA LA 8 CRmB, (20) SAL 5 CRmB, (21) SAL 5 CRmB a (23) SAL 8 CRmB nedošlo ve zkušebních tělesech ke vzniku trhliny. V tomto případě se tedy jedná o teplotu, která odpovídá maximálnímu dosaženému tahovému napětí a je možné usuzovat, že tato vlastnost je z hlediska nízkoteplotního chování výhodná. Kritické napětí se nacházelo v intervalu 0,83 MPa a 3,95 MPa. Nejhorší nízkoteplotní charakteristiky vykazala srovnávací asfaltová směs (1) ACO 11 S 70/100.

6.5 TUHOST ASFALTOVÝCH SMĚSÍ

Moduly tuhosti byly určeny podle normy ČSN EN 12697-26 dvoubodovou zkouškou ohybem na komolých klínech (trapezoidech). Návrhovou hodnotou v souladu s TP 170 je modul tuhosti stanovený při teplotě $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a frekvenci zatěžování 10 Hz.

Teplotní závislost modulů tuhosti jednotlivých asfaltových směsí v teplotním rozsahu $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ je patrná v grafu 18 při frekvenci zatěžování 10 Hz. Národní příloha normy ČSN EN 13108-1 (Funkční přístup) požaduje minimální hodnotu

modulu tuhosti směsí asfaltového betonu pro obrusné i ložní vrstvy 7000 MPa při teplotě 15 °C a frekvenci 10 Hz. Se snižující se teplotou a zvyšující se frekvencí zatěžování se zvyšuje hodnota modulu tuhosti asfaltové směsi. Z naměřených výsledků je vidět široký rozsah tuhostí jednotlivých asfaltových směsí. Z důvodu zvýšeného obsahu pojiva v asfaltových směších s CRmB oproti asfaltovým směším s konvenčními pojivy dosahují asfaltové směši s CRmB nižších tuhostí. Nejvyšší průměrnou tuhost dosahovaly směši asfaltového betonu a nejnižší průměrnou tuhost vykázaly směši asfaltového koberce drenážního s CRmB.



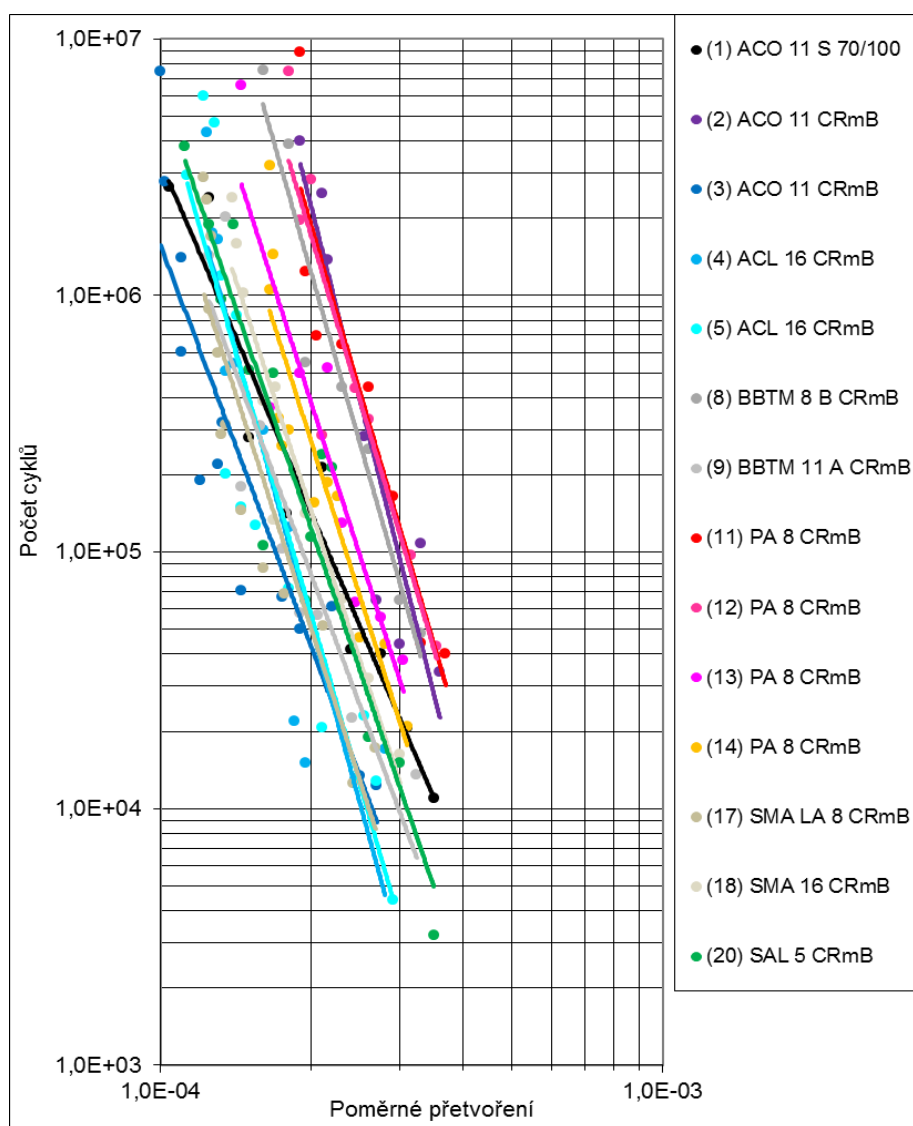
Graf 18: Závislost modulů tuhosti asfaltových směsí na teplotě při frekvenci 10 Hz

Poměrně těsná závislost byla nalezena mezi tuhostí asfaltových směsí a tloušťkou filmu asfaltového pojiva na povrchu kameniva i přesto, že složení jednotlivých asfaltových směsí se značně liší. Korelační koeficient R^2 dosahoval hodnoty téměř 0,7. S větší tloušťkou filmu pojiva tuhost asfaltových směsí klesá. Korelace byla nalezena i mezi tuhostí jednotlivých asfaltových směsí a jejich mezerovitostí, i když koeficient korelace byl 0,5. Teplotní citlivost je ovlivněna tloušťkou asfaltového filmu – s rostoucí tloušťkou filmu pojiva vzrůstá poměr modulů tuhosti stanovených při teplotě -5 °C k modulům tuhosti stanoveným při teplotě 25 °C. Rovněž mezerovitost souvisí s teplotní citlivostí asfaltových směsí, což může být zapříčiněno vztahem mezerovitosti a obsahu pojiva ve směsi.

6.6 ODOLNOST VŮČI ÚNAVĚ

Únava je definována jako následek pozvolného porušování vnitřní struktury zhutněné asfaltové směsi opakovaným střídavým zatížením. Projevuje se postupným poklesem modulu tuhosti v závislosti na počtu zatěžovacích cyklů. Únavová zkouška probíhá podle ČSN EN 12697-24 při konstantní teplotě +10 °C a při stálé

frekvenci zatěžovacích cyklů 25 Hz. Wöhlerův diagram únavy jednotlivých asfaltových směsí je zachycen v grafu 19.



Graf 19: Wöhlerův diagram únavy jednotlivých asfaltových směsí

Srovnávané asfaltové směsi dosahovaly široké rozpětí parametru ε_6 ($109 \cdot 10^{-6}$ až $221 \cdot 10^{-6}$) a parametru B v rozmezí 4,55 až 7,78. Kromě asfaltové směsi (3) ACO 11 CRmB splnily všechny asfaltové směsi požadavek ČSN EN 13108-1 na minimální hodnotu parametru ε_6 . Nejvyšší průměrné hodnoty parametrů únavy dosáhly směsi asfaltového koberce drenážního. Parametr ε_6 koreloval s tloušťkou filmu pojiva na povrchu kameniva jednotlivých asfaltových směsí (koeficient korelace R^2 nabýval hodnoty 0,68) a lze tedy říct, že s rostoucí tloušťkou filmu pojiva se zlepšují únavové vlastnosti asfaltových směsí s CRmB.

7 POKUSNÉ ÚSEKY

Na základě stanovení vlastností asfaltových směsí s CRmB pomocí laboratorních zkoušek byly vypracovány počáteční zkoušky typu (ITT – Initial Type Testing) pro jednotlivé asfaltové směsi podle ČSN EN 13108-20. Na základě těchto ITT byly

několika zhotoviteli realizovány pokusné úseky s cílem ověřit vlastnosti asfaltových vrstev vytvořených z asfaltových směsí s CRmB v reálných podmínkách provozu. Realizace vrstev prováděly společnosti Reimo a.s., Skanska a.s., Alpine Bau CZ, s.r.o., Strabag, a.s., ISB Brno, spol. s r.o., Swietelsky stavební s.r.o. a M – Silnice, a.s. Asfalt modifikovaný pryžovým granulátem dodaly společnosti Reimo a.s., Asphalt Rubber Italia S.r.l., Bisek a G Asfalt s.r.o.

V letech 2007 až 2012 bylo provedeno celkem 32 pokusných úseků obsahujících asfaltovou směs s CRmB, přičemž bylo vyrobeno téměř 11700 tun asfaltové směsi s CRmB. Tyto asfaltové směsi obsahovaly 990 tun asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem, přičemž bylo spotřebováno 175 tun pryžového granulátu.

Realizace jednotlivých pokusných úseků byla zdokumentována, byly provedeny kontrolní zkoušky asfaltových pojiv i asfaltových směsí a dále byly provedeny odběry jádrových vývrtů pro zjištění volumetrických charakteristik provedených asfaltových vrstev. V pravidelných intervalech je sledován stav pokusných úseků s ohledem na trvanlivost asfaltových vrstev a jejich užitných vlastností.

V tabulce 4 jsou shrnuty základní údaje o jednotlivých pokusných úsecích, včetně hodnocení současného stavu každého pokusného úseku jeho oznámkováním v rozsahu kategorií od 1 do 5 (1 – bezporuchový stav, 5 – havarijní stav).

Vyhodnocením současného stavu pokusných úseků je možné shrnout, že technologie asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem může být v určitých případech vhodnou technologií pro provedení asfaltových vrstev. Při využití technologie je ovšem nutné dbát na její specifika. Na základě zkušeností získaných při výrobě asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem a asfaltových směsí s tímto pojivem a na základě zkušeností získaných při pokládkách asfaltových vrstev s CRmB a při provádění kontrolních zkoušek je možné shrnout následující poznatky:

- je třeba provést výrobu CRmB tak, aby nebyla překračována doba zahřívání pojiva na vysokou teplotu a aby byla teplota v požadovaném intervalu,
- na obalovně je nutné věnovat zvláštní pozornost výkonu čerpadla dávkovacího systému asfaltu,
- z důvodu vysoké viskozity CRmB je nutné provádět pokládku a hutnění při příznivých klimatických podmínkách,
- je nutné dodržet teplotu asfaltové směsi s CRmB v požadovaných mezích,
- z důvodu obsahu pryžového granulátu v pojivu je nutné modifikovat provádění kontrolních zkoušek asfaltových směsí; z důvodu nebezpečí zanesení sít částicemi pryžového granulátu při provádění rozboru asfaltové směsi s CRmB nelze používat automatický analyzátor,
- při provádění kontrolních zkoušek může přítomnost pryžového granulátu ovlivnit výsledky provedeného síťového rozboru po extrakci – pryžový granulát slepuje částice fileru a tyto shluky se zachytí na sítích s většími otvory. Tomu lze částečně zabránit vysypáním kameniva na plochý plech, rozmělněním shluků kameniva a pryžového granulátu rukou a rozetřením shluků fileru a pryžového granulátu prsty.

Tab. 4 Tabulka pokusných úseků

| Č. | Úsek | SV/24 hodin | TV/24 hodin | Asfaltová směs | Stav | Silnice | Datum provedení | Délka úseku, m | Tl. vrstvy, mm | Hmotnost směsi, t | Obsah granulátu, % | Obsah CRmB, % | Mezerovitost vrstvy, % |
|----|-----------------------------|----------------|----------------|------------------|------|-----------|--------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|---------------------|---------------------------|
| 1 | Obalovna Kytín | - | - | BBTM 11 | 1 | ÚK | 9.-10.2007 | - | 30 - 70 | 300 | 20,0 | 8,3 | 8,0 - 12,0 |
| 2 | III/1157, Solopisky | 1809 | 314 | BBTM 11 | 3 | III/1157 | 10.2007 | 1800 | 20 - 50 | 1060 | 20,0 | 8,3 | 8,5 |
| 3 | Vjezd obalovny Reimo, Kytín | - | - | PA 8 | 1 | ÚK | 7.2008 | 50 | 30 | 21 | 18,0 | 9,2 | 15,2 |
| 4 | Michelská, Praha | 29374 | 7500 | PA 8 | 3 | MK | 10.-11.2008 | 1220 | 30 | 850 | 16,7 | 8,7 | 15,6 |
| 5 | R4, MÚK Kytín | - | - | PA 8 | 2 | R4 | 10.2009 | 1400 | 30 | 800 | 16,7 | 8,5 | 15,3 |
| 6 | I/18, Bohutín - Láz | 6612 | 545 | PA 8 | 2 | I/18 | 10.-11.2009 | 2250 | 30 | 1000 | 16,7 | 8,5 | 14,9 |
| 7 | Poděbradská, Praha, klesání | 27512 | 6200 | PA 8 | 2 | MK | 6.2010 | 1080 | 30 | 540 | 18,0 | 8,7 | - |
| 8 | Poděbradská, Praha stoupání | 27512 | 6200 | PA 8 | 1 | MK | 9.2010 | 1080 | 30 | 370 | 20,0 | 8,5 | 15,8 |
| 9 | Otakara Ševčíka, Brno | 35183 | 5653 | PA 8 | 4 | I/42 | 8.2010 | 500 | 30 | 560 | 15,3 | 8,0 | 19,6 |
| 10 | Obalovna Jihlava | - | - | PA 11 + PA 8 | 1 | ÚK | 8.2011 | 48 | 30+20 | 49+25 | 16,4+18,9 | 6,5+8,0 | 23,0+14,0 |
| 11 | | - | - | PA 11 | 1 | | 8.2011 | 55 | 40 | 57 | 16,4 | 8,0 | - |
| 12 | | - | - | SMA 8 S | 1 | | 8.2011 | 105 | 30 | 72 | 10,9 | 7,5 | - |
| 13 | | - | - | BBTM 5 B | 1 | | 8.2011 | 44 | 25 | 28 | 18,9 | 7,7 | 14,9 |
| 14 | | - | - | BBTM 5 A | 1 | | 8.2011 | 31 | 25 | 24 | 10,9 | 7,7 | - |
| 15 | | - | - | ARC 11 | 1 | | 8.2011 | 21 | 40 | 21 | 18,9 | 8,0 | 3,0 |
| 16 | II/398, Vranov nad Dyjí | 2050 | 106 | PA 11 | 1 | II/398 | 9.2011 | 500 | 40 | 233 | 16,4 | 8,0 | 11,8 |
| 17 | II/350, Příbyslav | 445 | 41 | AC 11 | 1 | II/350 | 10.2011 | 1760 | 40 | 916 | 16,0 | 8,0 | 5,3 |
| 18 | I/49, Zádveřice | 10846 | 2015 | PA 8 | 3 | I/49 | 10.2011 | 223 | 30 | 152 | 16,5 | 8,5 | 18,4 |
| 19 | II/358, Skuteč | 2534 | 293 | PA 8 | 1 | II/358 | 10.-11.2011 | 560 | 30 | 317 | 16,4 | 8,5 | 17,2 |
| 20 | I/53, Lechovice | 6420 | 1701 | SMA 8 S | 1 | I/53 | 11.2011 | 1100 | 30 | 300 | 15,0 | 8,5 | 7,9 |
| 21 | Fryčajova, Brno | 8058 | 877 | PA 8 | 1 | II/374 | 11.2011 | 300 | 30 | 136 | 16,4 | 8,2 | 17,8 |
| 22 | Rebešovice | 4800 | 250 | SMA 8 S | 1 | III/41614 | 5.2012 | 450 | 30 | 159 | 15,6 | 8,5 | 5,3 |
| 23 | Dobrovského, Brno | 16609 | 2557 | SMA 8 S | 1 | I/42 | 5.2012 | 1000 | 30 | 424 | 16,8 | 8,5 | 5,0 |
| 24 | Veslařská, Brno | 5800 | 350 | BBTM 5 A | 1 | MK | 6.2012 | 600 | 30 | 306 | 15,0 | 9,0 | 10,6 |
| 25 | Svatoplukova, Brno | 42555 | 5858 | BBTM 8 A | 1 | I/42 | 7.2012 | 550 | 30 | 517 | 15,3+16,3 | 8,2 | 8,9 |
| 26 | Koliště, Brno | 18000 | 520 | SAL 5 + BBTM 5 A | 1 | MK | 7.2012 | 300 | 30+30 | 320+300 | 15,3 | 10,0+9,0 | 1,9+9,7 |
| 27 | Nádvoří Chrlice | - | 26 | SAL 5 | 1 | ÚK | 7.2012 | - | 30 | 201 | 16,3 | 10,0 | 1,6 |
| 28 | Poděbradská, Praha | 27512 | 6200 | PA 8 (ARCT) | 1 | MK | 8.2012 | 760 | 30 | 330 | 18,0 | 8,6 | 16,2 |
| 29 | Hradecká, Brno | 16609 | 2557 | SMA 8 S | 1 | II/640 | 9.2012 | 600 | 30 | 659 | 17,0 | 8,5 | - |
| 30 | R46, Drysice | 21679 | 5040 | SMA 8 S | 1 | R46 | 11.2012 | 500 | 30 | 135 | 17,8 | 8,5 | 6,6 |
| 31 | Chrlice | 5100 | 320 | PA 11 | 1 | III/15282 | 11.2012 | 500 | 40 | 245 | 16,0 | 8,0 | 16,3 |
| 32 | Hustopeče | 9025 | 1786 | SAL 5 | 2 | II/425 | 11.2012 | 500 | 30 | 240 | 17,0 | 10,0 | 2,3 |

8 ZPRACOVÁNÍ TECHNICKÝCH PODMÍNEK TP 148

Aby bylo možné technologii asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem zavést v ČR do běžné praxe, bylo nutné vydat technický předpis, který by definoval specifika technologie a stanovil zásady pro použití konstrukčních vrstev vozovek z hutněných směsí stmelených silničním asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem při výstavbě, údržbě a opravách pozemních komunikací. Dále bylo nutné definovat zásady složení, návrhu a výroby asfaltové směsi a provádění a kontroly asfaltové vrstvy.

Na základě provedených prací shrnutých v předložené disertační práci bylo možné v roce 2008 začít pracovat na technických podmínkách Ministerstva dopravy. Vzhledem k tomu, že existovaly Technické podmínky č. 148 z roku 2001 s názvem „Hutněné asfaltové vrstvy s přídavkem drcené gumy z pneumatik“, které popisovaly již nevyužívaný suchý způsob výroby asfaltových směsí s přídavkem pryžového granulátu (technologie Rubit), bylo Ministerstvem dopravy rozhodnuto, že tento předpis bude revidován.

Na Fakultě stavební Vysokého učení technického v Brně proto byl sestaven text nových TP 148, který byl pomocí e-mailové korespondence předložen v srpnu 2008 odborné veřejnosti k připomínkování. Po zapracování připomínek bylo svoláno připomínkové jednání, na kterém bylo rozhodnuto, že novým Technickým podmínkám TP 148 bude prozatím ponechán status „Předběžné“ z důvodu novosti technologie v podmínkách ČR a předpis byl 16. 2. 2009 schválen Ministerstvem dopravy s platností od 1. 3. 2009. Zpracovatelem předpisu bylo Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební (Doc. Ing. Jan Kudrna, CSc. a Ing. Ondřej Dašek) a mezi spolupracující byly zahrnuty společnosti CONSULTTEST s.r.o. a EUROVIA Services, s.r.o.

Předpis s názvem „Hutněné asfaltové vrstvy s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem z pneumatik“ stanovuje zásady pro použití konstrukčních vrstev vozovek z hutněných směsí stmelených silničním asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem získaným z ojetých pneumatik a jinými pryžovými materiály při výstavbě, údržbě a opravách pozemních komunikací, dopravních a jiných ploch, nemotoristických komunikací a zpevněných krajnic. Stanovuje zásady složení, návrhu a výroby asfaltové směsi s CRmB a provádění a kontroly asfaltové vrstvy. Předpis obsahuje jedenáct kapitol a dvě přílohy.

V září roku 2011 bylo s představiteli Odboru pozemních komunikací Ministerstva dopravy dohodnuto, že je nutné předběžné technické podmínky přepracovat tak, aby předpis obsahoval nejnovější informace o technologii a zároveň aby získal status finálních technických podmínek. Do konce roku 2011 byl text přepracován a poté proběhlo připomínkové řízení. Po dvou připomínkových jednáních byl text předpisu schválen a přepracované technické podmínky s názvem „Hutněné asfaltové vrstvy s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem“ byly v lednu 2012 odevzdány Odboru pozemních komunikací Ministerstva dopravy. Předpis byl oznámen v souladu se Směrnicí Evropského parlamentu Rady 98/34/ES ze dne 22. června

1988, o postupu poskytování informací v oblasti technických norem a předpisů a pravidel pro služby informační společnosti, ve znění Směrnice Evropského parlamentu a Rady 98/48/ES ze dne 20. července 1998. V současné době tento předpis čeká na notifikaci členskými státy EU.

9 ZÁVĚR A SHRNU TÍ

Řešení problematiky v předložené disertační práci bylo vyvoláno požadavkem na zavedení technologie zpracovávající pryžový granulát metodou kontinuálního míchání silničního asfaltu s pryžovým granulátem získávaným zpracováním ojetých pneumatik v podmínkách ČR. Realizované experimenty zahrnují nejen popis vlastností materiálů, tj. pryžového granulátu, asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem a asfaltové směsi s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem v laboratorních podmínkách, ale také ověření vlastností vrstev obsahujících asfaltovou směs s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem (CRmB) na pokusných úsecích, které byly provedeny ve spolupráci s několika stavebními společnostmi.

Na základě provedených laboratorních zkoušek v rámci disertační práce lze formulovat následující závěry:

- Smísením pryžových granulátů s různými vlastnostmi od různých výrobců se silničními asfalty běžně dostupnými v ČR bylo zjištěno, že optimální dávkování pryžového granulátu se nachází v rozmezí 14,5 % až 17,0 %. V rámci tohoto intervalu je zajištěno dostatečné modifikování silničního asfaltu a současně zajištěna čerpatelnost pojiva a zpracovatelnost asfaltové směsi s CRmB.
- Hodnota dynamické viskozity asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem závisí zejména na druhu použitého silničního asfaltu, zrnitosti a původu pryžového granulátu, dávkovaném obsahu pryžového granulátu a teplotě a době mísení silničního asfaltu s pryžovým granulátem a je vždy vyšší než dynamická viskozita silničního asfaltu.
- Zkouška penetrace jehlou vykazovala v případě asfaltů modifikovaných pryžovým granulátem větší rozptyl výsledků, než u silničních asfaltů. To je zapříčiněno přítomností částic pryže v pojivu a ovlivněním vniku jehly do povrchu vzorku. To lze omezit provedením vpichů na místech hladkých a lesklých, stanovit čtyři výsledky a do průměru nejnižší naměřenou hodnotu penetrace nezapočítávat.
- Při měření bodu měknutí kulička předtím, než se dotkne základní desky, často poruší vrstvu CRmB, kterou je obalena, nebo lze pozorovat odlepení pojiva od kuličky. Tato měření lze považovat za platná, pokud splňují podmínku přípustného rozdílu dvou měření.
- Zkoušky CRmB je vhodné doplnit o zkoušku penetrace a pružné regenerace (resilience) podle určenou původně pro zálivky za horka, která umožňuje popsat elastomerní vlastnosti (pružnost) pojiva.

- Z oscilačních měření v dynamickém smykovém reometru lze odhadnout, že asfalty modifikované pryžovým granulátem mají v celém sledovaném časově frekvenčním rozsahu vyšší hodnoty komplexních modulů tuhosti a nižší hodnoty fázového úhlu než silniční asfalt. Lze to vysvětlit vytvořením polymerní sítě, ve které elastické vlastnosti pryže převládou nad typicky viskózním chováním nemodifikovaného silničního asfaltu. Tento trend má úzkou vazbu na obsah pryžového granulátu – s rostoucím obsahem pryžového granulátu se pojivo stává tužší a pružnější.
- Pomocí Blackových diagramů lze odvodit, že asfalt modifikovaný pryžovým granulátem v prvních 22 hodinách po vyrobení zlepšuje skladováním při teplotě 180 °C své vlastnosti – dochází k „doreagování“ asfaltu s pryžovým granulátem a ke zvyšování pružnosti pojiva (roste fázový úhel). S dalším udržováním pojiva při vysoké teplotě (180 °C) začíná dominovat degradace pryžového granulátu, přičemž se začnou zhoršovat vlastnosti pojiva, tvar Blackova diagramu se pozvolna začne přibližovat tvaru Blackova diagramu silničního asfaltu.
- Při zkoušce odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu (RTFOT) bylo zjištěno, že asfalty modifikované pryžovým granulátem s rostoucí dobou stárnutí zvyšují svou tuhost. Pro účinnější rozlišení odolnosti vůči stárnutí pojiv se jeví vhodné použití trojnásobné doby zkoušky (225 minut namísto 75 minut).
- I přes vyšší obsah pojiva v asfaltových směsích s CRmB, než je běžné u konvenčních asfaltových směsí, dosahují tyto asfaltové směsi dostatečnou odolnost vůči vzniku trvalých deformací.
- Z důvodu velké tloušťky CRmB na povrchu kameniva je – stejně jako v případě směsí asfaltového koberce mastixového – hodnota poměru pevnosti v příčném tahu mokrých a suchých těles (ITSR) pro asfaltové směsi s CRmB neprůkazná a tudíž dostatečně nevystihuje reálnou odolnost asfaltové směsi vůči působení vody.
- Zkušební tělesa vytvořená z asfaltové směsi s teoretickou tloušťkou filmu CRmB na povrchu kameniva větší než $10 \cdot 10^{-3}$ mm se většinou neporušovala trhlinou při jednoosé zkoušce nízkoteplotních charakteristik, což je výhodné z hlediska omezení vniku trhlin. Toto chování se u asfaltových směsí s konvenčními pojivy neprojevuje.
- Tuhost a únavové charakteristiky asfaltových směsí s CRmB byly ovlivněny tloušťkou filmu CRmB na povrchu kameniva – s rostoucí tloušťkou filmu pojiva na povrchu kameniva klesala tuhost a vzrůstala teplotní citlivost asfaltových směsí a zlepšovaly se jejich únavové charakteristiky.

V průběhu přípravy, provádění, kontroly a hodnocení pokusných úseků obsahujících asfaltové vrstvy se směsmi s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem byly zjištěny následující závěry a doporučení:

- Je nutné použití CRmB s vyhovující hodnotou dynamické viskozity, s čímž souvisí nutnost věnovat zvláštní pozornost výkonu čerpadla dávkovacího systému asfaltu.
- Z důvodu vysoké viskozity CRmB je nutné provádět pokládku a hutnění asfaltových vrstev při příznivých klimatických podmínkách.
- Pod vrstvu asfaltového koberce drenážního je nutné použít vrstvu se sníženou mezerovitostí (do mezerovitosti 5 %) nebo asfaltový postřik z CRmB (SAMI vrstvu).
- Vlastnosti asfaltů modifikovaných pryžovými granuláty jsou předvídatelné – jsou dány především druhem a množstvím pryžového granulátu a použitého silničního asfaltu. Jako kontrolní zkoušku je vhodné použít zkoušku dynamické viskozity při teplotě 175 °C těsně před spotřebováním pojiva obalovnou a poté v laboratoři provést zbývající zkoušky pojiva (penetrace jehlou, bod měknutí a penetrace a pružná regenerace – resilience).
- Při provádění kontrolních zkoušek může přítomnost pryžového granulátu ovlivnit výsledky síťového rozboru po extrakci – pryžový granulát slepuje částice fileru a tyto shluky se zachytí na sítích s většími otvory (tomu lze částečně zabránit vysypáním kameniva na plochý plech, rozmělněním shluků kameniva a pryžového granulátu rukou a rozetřením shluků fileru a pryžového granulátu prsty) nebo je možné použít upravený postup stanovení obsahu CRmB v asfaltové směsi s CRmB s oddělením pryžového granulátu, který je popsán v příloze 2 TP 148.

Provedené práce týkající se technologie asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem metodou kontinuálního míchání v ČR byly zdokumentovány a popsány tak, aby bylo možné vyhodnotit přínosy resp. nedostatky technologie a zavést tuto technologii do běžného užívání v ČR. Z toho důvodu byly v průběhu roku 2008 zpracovány Předběžné technické podmínky Ministerstva dopravy ČR s názvem „Hutněné asfaltové vrstvy s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem“ a s označením TP 148 a v únoru roku 2009 byly schváleny. V roce 2011 byly TP 148 přepracovány a revidovány a po připomínkovém řízení české odborné veřejnosti byly v roce 2012 předány k notifikaci členskými státy EU. Tyto TP 148 čerpají z výsledků předložené disertační práce a zahrnují použití CRmB v asfaltových směších, které mohou být vyrobeny všemi známými a v ČR dostupnými způsoby výroby (kontinuální míchání, terminálová výroba i technologie koncentráту CRmB), přičemž asfaltové směsi jsou blíže specifikovány, aby bylo možno využít přednosti těchto asfaltových směsí. Vydáním uvedeného předpisu bylo umožněno zavedení technologie asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem do podmínek České republiky a její využívání v běžné praxi.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BULLIN, J.A. et al. Development of Asphalts and Pavements Using Recycled Tire Rubber. Phase I: Technical Feasibility. DE-FC04-94AL99567. Texas Transportation Institute. 1996.
- [2] DAŠEK, O.; KUDRNA, J. Možnosti uplatnění odpadní pryže z ojetých pneumatik při modifikaci asfaltů. In Asfaltové vozovky 2011. 1. České Budějovice, Pragoprojekt, a.s. 2011. p. 1 - 6. ISBN 978-80-903925-2-6.
- [3] GAWEL, I.; STEPKOWSKI, R.; CZECHOWSKI, F. Molecular Interactions between Rubber and Asphalt. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2006.
- [4] HENIA, M.O.; GILLES, A. Effect of base bitumen composition on asphalt rubber binder properties. ISAP 2008. 10 s. 2008.
- [5] NETO, S. A. D.; FARIAS, M. M.; PAIS, J. C.; PEREIRA, P. A. A.; SOUSA, J. B. Influence of Characteristics of Crumb Rubber and Digestion Time on the Properties of Asphalt Rubber Binders. Road Materials and Pavement Design. 2005.
- [6] PRESTI, D.L.; MEMON, N.; AIREY, G. Influence of processing conditions on rheology of tyre rubber modified bitumens. AR2012. 16 s. 2012.
- [7] PUTMAN, B. J.; AMIRKHANIAN, S. N. Crumb Rubber Modification of Binders: Interaction and Particle Effects. Asphalt-Rubber 2006 Conference, 2006.
- [8] RACEK, I.; FIEDLER, J.; KAŠPAR, J.; BUREŠ, P.; KOMÍNEK, Z. Využití pryžového granulátu pro stavby vozovek. Dílčí výzkumná zpráva. Centrum integrovaného navrhování progresivních stavebních konstrukcí CIDEAS. 2008.
- [9] SHATNAWI, S. Comparisons of Rubberized Asphalt Binders. Asphalt-Rubber and Terminal Blend. White Paper. 16 s. 2011.
- [10] WAY, P.E.; KALOUSH, K.E.; BILIGIRI, K.P. Asphalt-Rubber Standard Practice Guide. Final report. First edition. 2011. [online]. Dostupný z WWW: <http://www.rubberpavements.org/Library_Information/AR_Std_Practice_Guide_20111221.pdf>
- [11] XIAO, F.; PUTMAN, B. J.; AMIRKHANIAN, S. N. Laboratory Investigation of Dimensional Changes of Crumb Rubber Reacting with Asphalt Binder. Asphalt-Rubber 2006 Conference, 2006.

ŽIVOTOPIS

Jméno a příjmení: Ing. Ondřej Dašek
Datum narození: 2. 11. 1981
Bydliště: Vltavská 202/3, Brno, 625 00
Telefon: + 420 541 14 73 43 (pracoviště)
E-mail: dasek.o@fce.vutbr.cz

Vzdělání

2006 – 2013 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, doktorandské studium v oboru Konstrukce a dopravní stavby
2001 – 2006 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, magisterské studium v oboru Konstrukce a dopravní stavby
1997 – 2001 Střední průmyslová škola stavební v Brně

Pedagogická činnost

AR 2012/13 cvičení z předmětu CM51 Diagnostika a management vozovek
cvičení z předmětu CM03 Technologie pozemních komunikací
AR 2011/12 cvičení z předmětu CM51 Diagnostika a management vozovek
cvičení z předmětu CM03 Technologie pozemních komunikací
AR 2010/11 cvičení z předmětu BO01 – Konstrukce a dopravní stavby
AR 2009/10 cvičení z předmětu BO01 – Konstrukce a dopravní stavby
AR 2008/09 cvičení z předmětu BO01 – Konstrukce a dopravní stavby

Zaměstnání

2007 - současnost zaměstnán na Ústavu pozemních komunikací, Fakulta stavební Vysokého učení technického na pozici technika pro výzkum a vývoj
2003 - 2005 zaměstnán v CONSULTEST s.r.o. na pozici laboranta

Jazykové znalosti

Anglický jazyk mírně pokročilý
Německý jazyk pasivně